



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

ANALÝZA OFTALMOLOGICKÝCH DAT Z POHLEDU DIAGNOSTIKY GLAUKOMU

ANALYSIS OF OPHTHALMOLOGICAL IMAGES AIMED TO DIAGNOSIS OF GLAUCOMA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

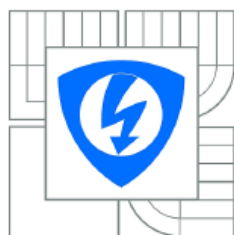
MARTINA VODÁKOVÁ

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN ODSTRČILÍK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Biomedicínská technika a bioinformatika

Studentka: Martina Vodáková
Ročník: 3

ID: 119761
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Analýza oftalmologických dat z pohledu diagnostiky glaukomu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte vlastnosti dodaných oftalmologických dat, zejména snímků sítnice z digitální fundus kamery a optické koherentní tomografie. Zaměřte se na texturní vlastnosti vrstvy nervových vláken (VNV). Seznamte se s principy texturní analýzy a dle pokynů vedoucího vybrané metody nastudujte. S využitím dostupných obrazových dat z fundus kamery vytvořte ucelý soubor vzorků textury zdravé a nemocné tkáně VNV, který dále podrobte kvalitativní a kvantitativní texturní analýze. Proveďte také korelační analýzu získaných výsledků s ohledem na korespondující data z optické koherentní tomografie. K implementaci metod použijte programové prostředí MATLAB. Proveďte diskusi a zhodnocení dosažených výsledků. K vytvořeným programovým modulům sepište přehlednou dokumentaci a návod k obsluze.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KOLÁŘ, R. Methods for image analysis and pattern recognition - Application to early glaucoma diagnosis, habilitační práce, ÚBMI, FEKT VUT Brno, 2008.
[2] NOVOTNÝ, A.; ODSTRČILÍK, J.; KOLÁŘ, R.; JAN, J. Texture Analysis Of Nerve Fibre Layer In Retinal Images Via Local Binary Patterns And Gaussian Markov Random Fields. In 20th Biennial International EURASIP Conference BIOSIGNAL 2010. EURASIP. Brno: EURASIP, 2010. p. 308-315.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jan Odstrčilík

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na texturní analýzu snímků sítnice s vysokým rozlišením s cílem subjektivně a kvantitativně popsat vlastnosti textury tvořené vrstvou nervových vláken. Na každém snímku byla předdefinována oblast zájmu v podobě deseti sektorů. V každém sektoru byla sledována korelace mezi subjektivním a kvantitativním hodnocením textury. Výsledky ukazují, že navrhované základní příznaky jsou úzce spojeny s texturními vlastnostmi získanými z vizuálního vzhledu vrstvy nervových vláken. Poslední krok popisuje porovnání výsledků hodnocení textury vrstvy nervových vláken s kvantitativně změřenou tloušťkou vrstvy nervových vláken z dat optické koherentní tomografie.

KLÍČOVÁ SLOVA

Glaukom, vrstva nervových vláken, fundus snímky, optická koherentní tomografie, texturní analýza, korelační analýza.

ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on fundamental texture analysis of high-resolution fundus images aimed to subjectively and quantitatively describe properties of texture formed by the retinal nerve fiber layer. An area of interest was predefined in the form of ten sectors on each fundus image. The correlation between results of subjective and quantitative evaluation of the texture was monitored in each sector. The results show that proposed fundamental texture features are closely related to the subjective textural properties obtained from visual appearance of the retinal nerve fiber layer. The last step compares results from fundamental texture analysis with quantitative measurement of the retinal nerve fiber layer thickness provided by Optical Coherence Tomography.

KEYWORDS

Glaucoma, retinal nerve fiber layer, fundus images, optical coherence tomography, texture analysis, correlation analysis.

VODÁKOVÁ, M. *Analýza oftalmologických dat z pohledu diagnostiky glaukomu.*
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních
technologií, 2011. 51 s., 3 přílohy. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Odstrčilík.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „Analýza oftalmologických dat z pohledu diagnostiky glaukomu“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 27. května 2011

.....

podpis autora

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Janu Odstrčilíkovi. Děkuji za vedení této bakalářské práce, za navrhovaný postup řešení, dodané materiály, pomoc při dílčím zpracování dat a za veškerý čas věnovaný konzultacím.

Práce byla podporována výzkumným centrem DAR (Data, Algorithms, Decision Making), Ústav teorie informace, Akademie věd ČR (projekt č. 1M0572).

V Brně dne 27. května 2011

.....

podpis autora

OBSAH

Obsah	vi
Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Vrstva nervových vláken na sítnici	3
1.1 Funkce nervových vláken na sítnici.....	3
1.2 Struktura vrstvy nervových vláken na sítnici.....	4
1.3 Ztráta nervových vláken na sítnici.....	6
1.3.1 Funkční změny glaukomového poškození.....	7
1.3.2 Morfologické změny glaukomového poškození.....	7
1.3.3 Rizikové faktory glaukomového poškození.....	8
2 Oftalmologické zobrazovací modality pro diagnostiku glaukomu	10
2.1 Digitální fundus kamera.....	10
2.1.1 Vlastnosti obrazových dat pořízených fundus kamerou.....	11
2.1.2 Charakteristika textury VNV na fundus snímcích.....	12
2.1.3 Kvalita fundus snímků.....	13
2.2 Optická koherentní tomografie.....	13
2.2.1 Vlastnosti dat pořízených optickou koherentní tomografií.....	14
2.3 Charakteristika obrazových dat použitých k analýze.....	15
2.3.1 Databáze obrazových dat ÚBMI.....	15
2.3.2 Databáze obrazových dat Erlangen.....	17
3 Metodika analýzy pro hodnocení textury VNV	19
3.1 Kvalitativní texturní analýza VNV.....	19
3.1.1 Vymezení oblasti zájmu pro účely hodnocení textury.....	20
3.1.2 Definování parametrů hodnotících texturu VNV.....	20
3.2 Kvantitativní texturní analýza VNV.....	21
3.3 Ověření účinnosti použitých metod.....	22
3.3.1 Korelační analýza.....	23
3.3.2 Korelační koeficient.....	23

4 Použití navržené metodiky pro hodnocení textury VNV	25
4.1 Předzpracování vstupních obrazových dat.....	25
4.1.1 Rozdělení analyzovaných dat.....	25
4.1.2 Definování oblastí zájmu pro účely hodnocení textury.....	25
4.1.3 Tvorba datových souborů se vzorky textury VNV.....	26
4.1.4 Přepočet souřadnic vybraných vzorků z fundus snímku do tloušťkové mapy z OCT.....	28
4.2 Texturní analýza VNV.....	30
4.2.1 Subjektivní hodnocení textury VNV v okolí optického disku.....	30
4.2.2 Výpočet kvantitativních texturních příznaků VNV.....	32
4.3 Hodnocení výstupů texturní analýzy.....	33
4.3.1 Základní subjektivní porovnání výsledků texturní analýzy.....	33
4.3.2 Výpočet korelačních koeficientů.....	35
4.3.3 Multimodální přístup korelační analýzy zahrnující OCT data.....	36
5 Realizované programové funkce	40
6 Diskuse dosažených výsledků	43
Závěr	46
Literatura	48
Seznam symbolů a zkratk	51
Seznam příloh	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Schematický řez sítnicí.....	4
Obr. 1.2: Vnitřní povrch sítnice.....	5
Obr. 1.3: Střední oblast sítnice a její schematický řez.....	6
Obr. 1.4: Znázornění postupujících ztrát ve VNV.....	8
Obr. 2.1: Fundus kamera CANON FC-60 UVi.....	10
Obr. 2.2: Příklad jednotlivých složek RGB obrazu.....	11
Obr. 2.3: Příklad textury ve výřezech upravených snímků.....	12
Obr. 2.4: Řez oblastí foveoly – OCT B-sken (nahore), histologický řez (dole)	14
Obr. 2.5: Příklad zobrazení sítnice s defektem ve VNV z databáze ÚBMI.....	16
Obr. 2.6: Příklad fundus snímku zdravého oka z databáze Erlangen.....	17
Obr. 2.7: Příklad zobrazení sítnice s defektem ve VNV z databáze Erlangen.....	18
Obr. 3.1: Kružnice rozdělující oblast zájmu na jednotlivé sektory.....	20
Obr. 3.2: Příklady grafického zobrazení míry korelace	24
Obr. 4.1: Příklad vzorků ze sektoru č. 2 ze skupin zdravých očí.....	27
Obr. 4.2: Vzorky ze sektorů č. 6 a 7 pro oko L7 ze skupiny data Erlangen – nemocná. 27	
Obr. 4.3: Postup redukce vzorků na základě dostupných korespondujících OCT dat... 29	
Obr. 4.4: Maska sektorů pro hodnocení textury VNV.....	31
Obr. 4.5: Grafické srovnání subjektivního a kvantitativního hodnocení textury.....	34
Obr. 4.6: Grafické srovnání subjektivního a kvantitativního hodnocení textury	35
Obr. 4.7: Graf kolísání tloušťky VNV napříč sektory (pro data zdravých očí).....	37
Obr. 4.8: Korelační diagramy tloušťky VNV a texturních příznaků pro zdravé oči.....	38
Obr. 4.9: Korelační diagramy tloušťky VNV a texturních příznaků pro nemocné oči... 39	
Obr. 6.1: Sloupcový graf korelačních koeficientů tloušťky VNV s jednotlivými příznaky	44

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Základní charakteristika dostupných databází.....	15
Tab. 3.1: Významy skóre pro parametry textury VNV.....	21
Tab. 3.2: Významy skóre pro parametry kvality fundus snímků.....	21
Tab. 4.1: Počty analyzovaných fundus snímků.....	25
Tab. 4.2: Celokové počty vybraných vzorků textury VNV.....	26
Tab. 4.3: Počty snímků a vzorků využitých k multimodální analýze.....	30
Tab. 4.4: Průměrná skóre jednotlivých sektorů pro zdravé snímky ÚBMI.....	31
Tab. 4.5: Průměrná skóre jednotlivých sektorů pro zdravé snímky Erlangen.....	31
Tab. 4.6: Průměrná skóre úrovně jasu pro nemocné snímky.....	31
Tab. 4.7: Průměrné hodnoty texturních příznaků pro data ÚBMI - zdravá.....	32
Tab. 4.8: Průměrné hodnoty texturních příznaků pro data Erlangen - zdravá.....	32
Tab. 4.9: Průměrné hodnoty texturních příznaků pro data ÚBMI - nemocná.....	32
Tab. 4.10: Průměrné hodnoty texturních příznaků pro data Erlangen - nemocná.....	32
Tab. 4.11: Korelační koeficienty pro subjektivní parametr úrovně jasu a základní kvantitativní příznaky textury VNV.....	36
Tab. 4.12: Korelační koeficienty pro tloušťku VNV a výstupy texturní analýzy VNV.	37

ÚVOD

Glaukomové poškození, při němž dochází k odumírání nervových buněk na sítnici, je jedním z nejčastějších příčin permanentní slepoty ve světě [4]. Pro potlačení progresivního průběhu onemocnění, případně pro jeho úplné zastavení, je proto nutná včasná diagnostika. K vyšetření očního pozadí bývá využíváno digitálních fundus kamer, které poskytují neinvazivní pohled na sítnici oka.

V současné době se diagnostika glaukomového onemocnění, s využitím fundus fotografií sítnice, opírá běžně o analýzu morfologie optického disku [4]. Posuzování snímků sítnice z hlediska charakteru textury reprezentující vrstvu nervových vláken (VNV) s cílem diagnostiky onemocnění je závislé pouze na odborných znalostech a zkušenostech jednotlivých oftalmologů. Diagnostika glaukomu založená přímo na automatické počítačové analýze textury VNV z digitálních fundus fotografií se do popředí zájmu dostává teprve v nedávné době díky zlepšujícím se technologiím a stále rostoucím možnostem získání kvalitních snímků sítnice s vysokým rozlišením. Počítačovou analýzou textury VNV s využitím fotografií sítnice se zabývají např. aktuální publikace [20] nebo [18]. Plně automatická analýza VNV, která by byla použitelná pro diagnostiku změn VNV v klinické praxi, však zatím stále neexistuje.

Automaticky a objektivně lze v současnosti VNV hodnotit prostřednictvím optické koherentní tomografie (OCT) [5], která umožňuje měřit kvantitativně tloušťku VNV nebo laserové polarimetrie GDx [5]. Mimo studie zabývající se výhradně texturní analýzou snímků sítnice, se v současné době objevují i studie prezentující multimodální analýzy dat. Článek [10] popisuje srovnání závislosti viditelných výpadků VNV na fundus snímcích s kvantitativně změřenou tloušťkou VNV pomocí OCT, ovšem prozatím jen z medicínského hlediska bez jakékoliv automatické analýzy.

Tato bakalářská práce je zaměřena na analýzu VNV s využitím fundus fotografií sítnice a prezentuje detailní náhled na základní vlastnosti textury VNV ze subjektivního a kvantitativního úhlu pohledu. Navržené metody řešení berou v úvahu několik přístupů hodnocení textury VNV. Inspirací navrhované metodice jsou jedny z prvních pokusů

o subjektivní hodnocení textury VNV na analogových fotografiích sítnice z roku 1984, prezentovaných článkem [1]. Následně je využito základních statistických příznaků pro popis texturního obrazu. Dosažené výsledky, v podobě výstupů z texturní analýzy, jsou dále podrobovány ověřování účinnosti navržené metodiky prostřednictvím zjišťování míry korelace, včetně zahrnutí multimodálního přístupu, využívajícího objektivní informace o tloušťce VNV z dat pořízených pomocí OCT.

1 VRSTVA NERVOVÝCH VLÁKEN NA SÍTNICI

Vrstva nervových vláken (VNV) se jako jedna z vrstev sítnice (retina) spolupodílí na procesu vidění. Ztráty nervových vláken sítnice podle svého rozsahu vedou k různě velkým poruchám vidění, případně až k úplné slepotě.

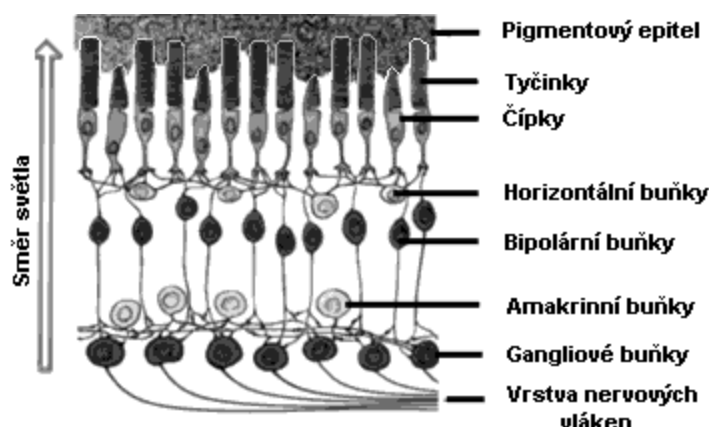
Tato kapitola podává stručný přehled o významu VNV, jejím charakteru a důsledcích její ztráty. Vzhledem k zaměření této práce jsou v následujícím textu uváděny pouze obecné poznatky přímo související s významem VNV. Blíže se procesu vidění, včetně anatomických a fyziologických přehledů lidského oka, jeho jednotlivých částí a onemocněním, věnuje literatura [7] a [28].

1.1 Funkce nervových vláken na sítnici

Při průchodu světla okem je VNV první vrstvou sítnice, kterou světlo prochází (viz Obr. 1.1). V předposlední vrstvě tvořené fotoreceptory (tyčinkami a čípkami) je světelná informace transformována na elektrický signál. Fotoreceptory mají při dopadu světla schopnost hyperpolarizace na niž horizontální a bipolární buňky z vnitřnějších vrstev sítnice reagují rovněž svou hyperpolarizací či depolarizací [11]. Tyto elektrické projevy se dostávají zpět do vnitřnější vrstvy sítnice, která je tvořena gangliovými buňkami. Axony (neurity) gangliových buněk přivádějí informaci v podobě nervového impulsu přímo do vyšších zrakových center. Právě axony, kterých je na sítnici cca 1 mil. [7], reprezentují vlákna tvořící VNV. Axony se na vnitřním povrchu sítnice sbíhají do jednoho místa, aby v podobě zrakového nervu oko společně opustily. Místo, z něhož zrakový nerv z oka vychází, se nazývá optický disk (terč zrakového nervu).

Uspořádání jednotlivých vrstev sítnice vykazuje konvergentní charakter. Informace z několika fotoreceptorů je předávána jedné bipolární buňce, několik bipolárních buněk je synapticky vázáno na jednu buňku gangliovou. Ve vytvořené neuronové síti dochází ke značné sumaci přenášené informace (cca 132 mil. fotoreceptorů na 1 mil. gangliových buněk [28]). Jednotlivá vlákna VNV se na povrchu sítnice dále sdružují do větších svazků. Sítnice tak přicházející světelnou informaci

nejen přijímá a přenáší, ale i předem zpracovává.

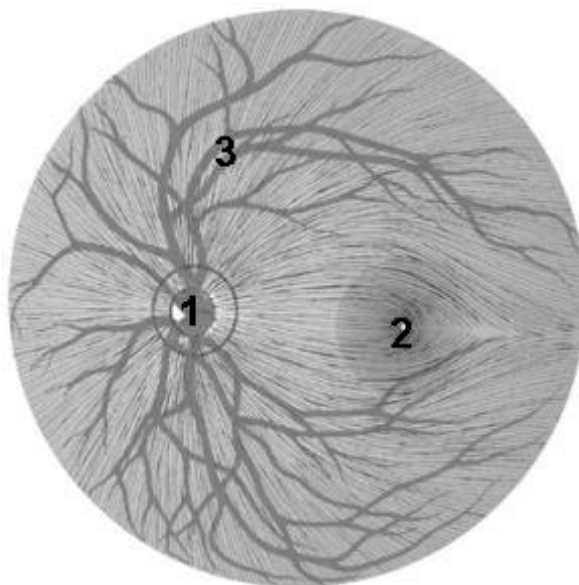


Obr. 1.1: Schematický řez sítnicí, [29]

Nutnost světla prostupovat jednotlivými vrstvami sítnice způsobuje, že přibližně 90 % intenzity světla, které do oka dopadá a pro samotné podráždění fotoreceptorů není potřebné, je pohlceno a rozptýleno dříve, než se k fotoreceptorům dostane [11]. Vnitřní vrstvy sítnice včetně VNV musí být pro procházející světlo transparentní. Axony gangliových buněk proto nejsou kryty izolační a ochrannou myelinovou pochvou. K myelinizaci axonů dochází až po opuštění povrchu sítnice, uvnitř zřetkového nervu. Nicméně fakt fyziologické absence myelinu nečiní nervová vlákna VNV nikterak náchylná k poškození. Při demyelinizačních chorobách dochází k poškození zřetkového nervu beze změn na axonech sítnice [7].

1.2 Struktura vrstvy nervových vláken na sítnici

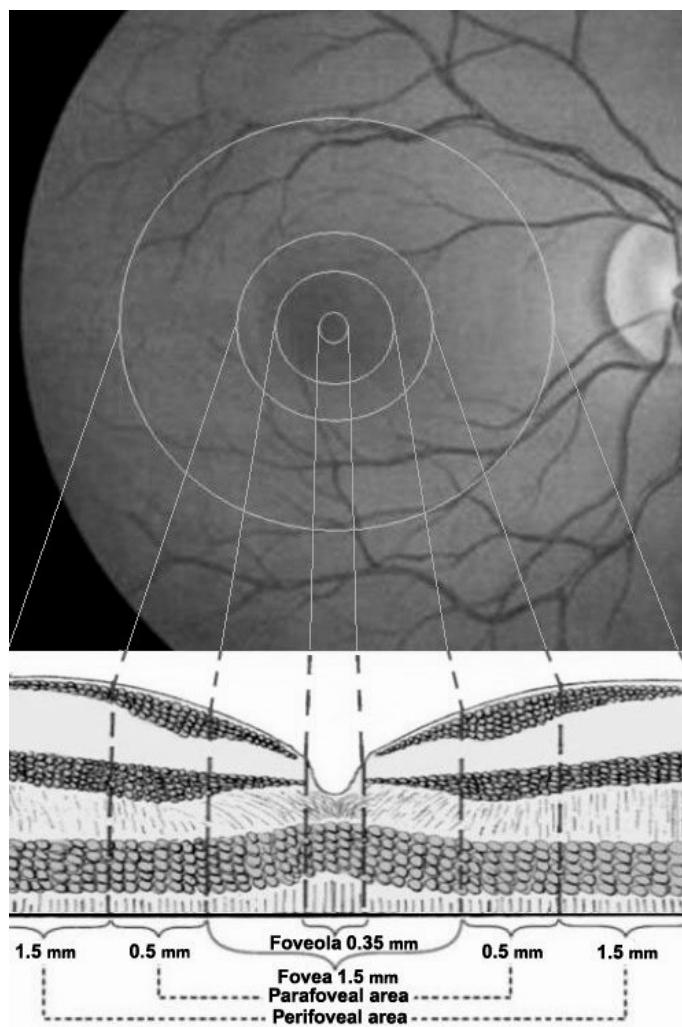
Průběh nervových vláken tvořících vnitřní povrch sítnice za pomoci bezčerveného světla poprvé představil A. Vogt v letech 1913 [21]. Axony se sdružují do malých svazků o průměru 20 μm [14]. Tyto svazky vedou směrem od periferie sítnice k optickému disku, z něhož jako jediný svazek oko opouští. Odklon od pravidelně paprskitého průběhu nervových vláken tvoří horizontální předěl temporálně od makuly (žluté skvrny). Vlákná jdoucí od tohoto předělu obcházejí střed makuly – foveu (centrální jamku) a nabývají obloukovitého směru. Typický průběh vláken ilustruje Obr. 1.2.



**Obr. 1.2: Vnitřní povrch sítnice, [6],
1 – optický disk, 2 – makula, 3 – cévní řečiště, podklad – typická textura tvořená VNV**

VNV je v různých místech sítnice různě silná. Vzhledem k přibývajícimu počtu svazků vláken v okolí optického disku se VNV v této oblasti stává silnější než na periferii. Anatomické uspořádání makuly se odlišuje od klasické stavby sítnice. Makula (v průměru přibližně 5,5 mm) se trychtýřovitě prohlubuje ve foveu, jejíž dno se nazývá foveola (viz Obr. 1.3). Foveolu tvoří pouze čípky s minimem podpůrné tkáně vnějších sítnicových vrstev. Vnitřní vrstvy sítnice jsou z foveoly vysídleny. Bipolární i gangliové buňky náležící čípkům foveoly se z tohoto místa radiálně rozestupují. Světlo dopadající na foveolu v přímém směru nemusí prostupovat množstvím vrstev, což přispívá k eliminaci rozptylu světla. Tento fakt, společně se samotnou vyšší koncentrací čípků ve foveole a se sníženým poměrem počtu čípků na gangliovou buňku (cca 1:1 oproti běžnému poměru 4-6:1), vede k nejvyšší rozlišovací schopnosti oka právě v místě foveoly [12].

VNV je tedy v oblasti povrchové deprese (průměr asi 1,5 mm), vzniklé rozstupem gangliových i bipolárních buněk, redukována. Nicméně v širší oblasti makuly je koncentrace nervových vláken naopak zvýšena v závislosti na vyšším počtu gangliových buněk do této oblasti odkloněných.



Obr. 1.3: Střední oblast sítnice a její schematický řez, [12]

1.3 Ztráta nervových vláken na sítnici

Pod souhrnným termínem glaukom (zelený zákal) se schraňuje více onemocnění, jejichž společným projevem či příčinou bývá mimo jiné zvýšený nitrooční tlak [7]. Současně je do této skupiny onemocnění řazena nemoc v oftalmologické praxi označována jako glaukomové poškození, projevující se ztrátou zraku v důsledku odumíráním nervových buněk sítnice.

1.3.1 Funkční změny glaukomového poškození

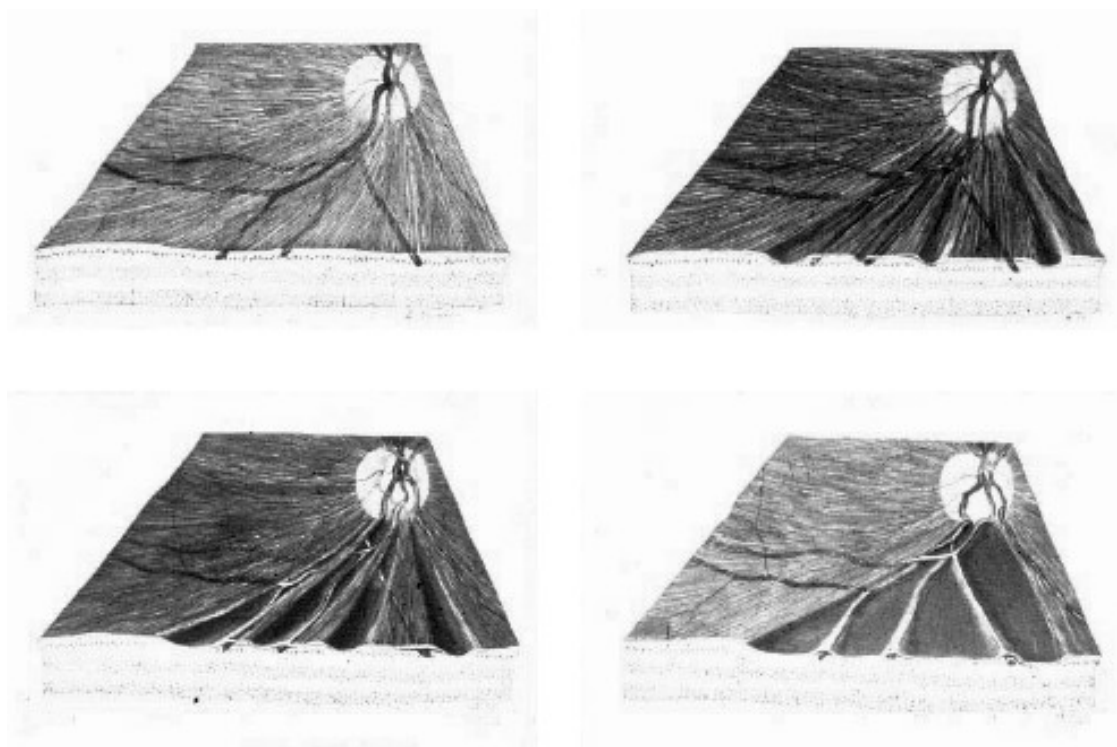
Chybějící nervové buňky sítnice mají za následek narušení spojení s vyššími zrakovými centry a tato skutečnost vede ke ztrátě zraku. Nervové buňky podléhají přirozené redukci vlivem stárnutí organismu. Tyto přirozené ztráty jsou ovšem pozvolné a zanedbatelné, nemají tak na kvalitu vidění významný vliv. Naproti tomu ztráty glaukomového poškození nabývají většího rozsahu a mají vždy progresivní charakter. Již zaniklé buňky není možné nahradit, ovšem při včasné diagnóze onemocnění lze průběh postupující nemoci zpomalit nebo dokonce zastavit a vidění tím zachovat ve stávající kvalitě.

Funkčně se ztráta nervových buněk nejběžněji projevuje defekty zorného pole, v počátcích onemocnění se objevují poruchy barevného vidění a adaptace na tmu; ostrost zraku zůstává beze změn zachována [7]. V raném stádiu onemocnění nedochází k subjektivnímu pocitu zhoršeného vidění. Chybějící informace jsou vlivem složitosti celého procesu vidění kompenzovány, výsledkem je tak vjem scény s pozměněnými detaily, které jsou pro pacienta subjektivně nezaznamenatelné a nehodnotitelné. K úplným výpadkům v zorném poli dochází řádově v letech po tom, co se objevily první oftalmologicky hodnotitelné příznaky onemocnění v podobě odumírajících nervových vláken [7]. Klíčovou úlohu v léčbě tak sehrává včasná diagnostika, která onemocnění odhalí dříve, než pacient začne kvalitativní změny vidění sám pozorovat. Zde se pro efektivní a včasnou diagnostiku jeví jako výhodná možnost aplikace masového screeningu v populaci [24].

1.3.2 Morfologické změny glaukomového poškození

Výpadky VNV bývají často charakteristické svým klínovitým tvarem, který se táhne od optického disku a směrem do prostoru se rozšiřuje. Na Obr. 2.5c je výpadek VNV tohoto tvaru na reálném snímku sítnice diagnostikován a vyznačen oftalmologem. Defekt ve VNV s klínovitým tvarem, jako časný projev glaukomového poškození, byl popsán Hoytem a Newmannem v roce 1972, o rok později byla stejnými autory potvrzena souvislost výpadku se ztrátami v zorném poli pacientů [21]. V následujících letech byly dalšími autory publikovány různé lokality sítnice s odlišnými tvary výpadků VNV, progresivita ztrát nervových vláken spojená s difúzním charakterem onemocnění.

VNV může na sítnici chybět úplně v celé své tloušťce. V tomto případě se výpadek označuje za výpadek fokální. Pokud je ve VNV oslabena pouze část tkáně nervových vláken, jedná se o výpadek difúzní. Při progresi onemocnění bývají nejdříve poškozena vlákna hlubších vrstev nervové tkáně [14]. Defekt je překryt svrchnějšími zachovanými vlákny, a tak není při pozorování sítnice zcela zřejmý. Změny VNV jsou oftalmoskopicky hodnotitelné až při ztrátách převyšujících 50 % původní tloušťky VNV [14]. Obr. 1.4 znázorňuje postupně se rozšiřující ztráty nervových vláken na sítnici.



Obr. 1.4: Znázornění postupujících ztrát ve VNV, [25]

1.3.3 Rizikové faktory glaukomového poškození

Naproti neovlivnitelným rizikovým faktorům vzniku nemoci (např. věk, pohlaví, refrakční vady) stojí faktory, které lze kontrolovat – především zvýšený nitrooční tlak a snížený tlak systémový. Přestože je právě nitrooční tlak se vznikem glaukomového poškození velmi často spojován, jeho zvýšení nad hodnotu 21 mm Hg (horní hraniční hodnota normálního nitroočního tlaku [7]) nemusí vést ke vzniku glaukomu.

Glaukomové oko často vykazuje větší kolísání hodnot tlaku během dne než oko zdravé. Větší výkyvy nitroočního tlaku jsou tedy škodlivější než tlak stálý, byť zvýšený [7].

Konkrétní příčina odumírání nervových vláken na sítnici není dodnes přesně známa. Dle [7], gangliové buňky pravděpodobně odumírají apoptózou (programovanou buněčnou smrtí) v důsledku oběhových problémů zapříčiněných již zmíněným zvýšením nitroočního tlaku nebo snížením tlaku krevního. Právě kolísání těchto tlaků způsobuje zhoršení schopnosti udržet oční perfúzi (průtok krve okem) na konstantní hodnotě. Snížená perfúze vede k ischemii, fáze reperfúze ke vzniku volných kyslíkových radikálů, ty mohou způsobit nárůst koncentrace glutamátu, který při toxických hodnotách zapříčiňuje odumírání buněk.

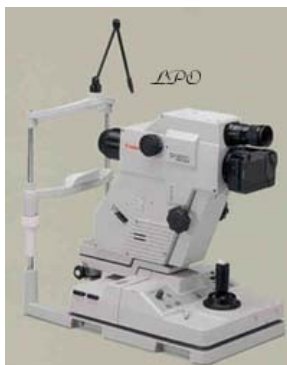
2 OFTALMOLOGICKÉ ZOBRAZOVACÍ MODALITY PRO DIAGNOSTIKU GLAUKOMU

Při vyšetření očního pozadí mohou diagnostické metody vycházet z možnosti neinvazivního zobrazení retinální tkáně. Jednotlivé oftalmologické zobrazovací modalitty pracují na různých fyzikálních principech s cílem interpretovat konkrétní anatomicko - morfologickou informaci o sítnici s maximálním diagnostickým přínosem. Mimo jednoduchý oftalmoskop, který umožňuje jednorázové nahlédnutí na zadní segment oka, lékařská diagnostická praxe v oftalmologii využívá např. ultrasonografii, skenovací laserové oftalmoskopy modifikované do konfokální nebo perimetrické podoby.

Na základě zadání této bakalářské práce se následující podkapitoly věnují bližšímu popisu digitální fundus kamery, optické koherentní tomografie (OCT) a charakteristice dat, které tyto modalitty poskytují.

2.1 Digitální fundus kamera

Fundus kamera je specializované snímací zařízení tvořené nízkovýkonovým mikroskopem s připojeným digitálním fotoaparátem. Kamera obsahuje zdroj bílého světla, kterým je během pořizování snímku sítnice osvětlena. Světlo odražené od sítnice je následně snímáno CCD prvkem. Výstupem je makroskopická fotografie zobrazující oční pozadí. Fundus kamera značky CANON FR-60 UVi viz Obr. 2.1.

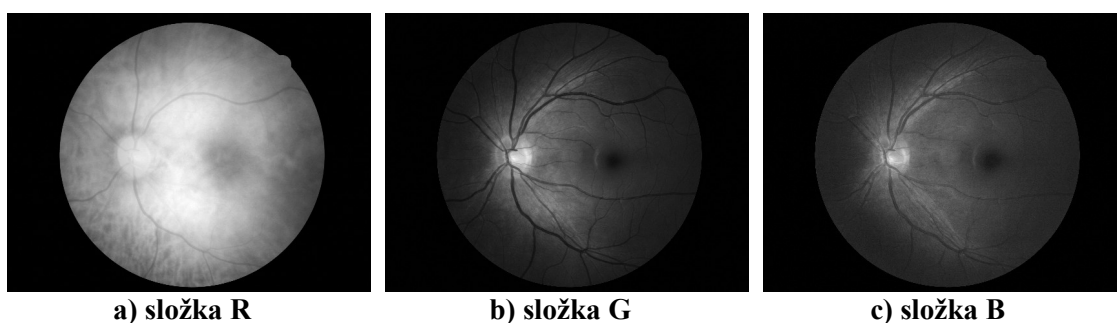


Obr. 2.1: Fundus kamera CANON FC-60 UVi, [32]

Software fundus kamer běžně umožňuje automatickou detekci středu sítnice a automatické ostření založené na frekvenční analýze snímaného obrazu. Některé systémy podporují automatické řízení intenzity osvětlení sítnice na základě průměru jasu předchozích snímaných obrazů [23].

2.1.1 Vlastnosti obrazových dat pořízených fundus kamerou

Jak již bylo zmíněno, axony gangliových buněk sítnice neobsahují myelinovou pochvu kvůli potřebě zachování transparentnosti procházejícího světla. Vzhledem ke své průhlednosti jsou tak často těžce zobrazitelné. Odrazem světla od sítnice, během pořizování snímku fundus kamerou, jsou vlákna zobrazena jako světlé proužky. Na obyčejných barevných snímcích z fundus kamery je očekávaná textura subjektivně prakticky nehodnotitelná. Při hodnocení, jakou informaci o nervových vláknech nesou jednotlivé složky RGB obrazu (R – červená, G – zelená, B – modrá), vychází dle [4] a [18] nejlépe složky zelená a modrá; srovnání je možné na Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Příklad jednotlivých složek RGB obrazu

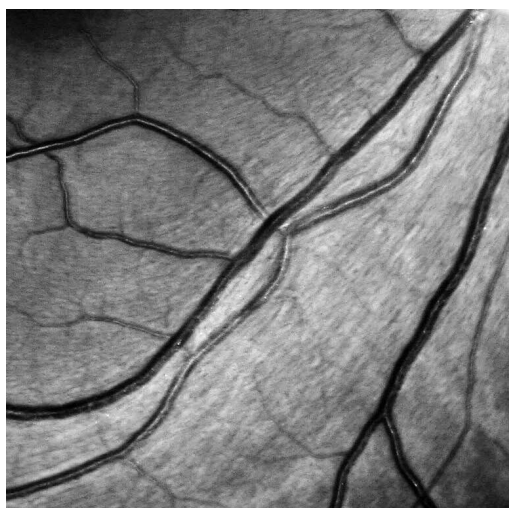
Pro analýzu textury VNV je vhodné snímky převést do šedotónové podoby pomocí průměru zelené a modré složky. S výhodou lze také už při snímání sítnice využít autofluorescenční filtry. Tyto filtry potlačí červenou složku RGB obrazu primárně již při pořizování snímku. Informace poskytované fundus snímkem pořízeným bez filtru, přes filtr, i snímkem převedeným do šedotónové podoby, je možné porovnat na Obr. 2.5.

2.1.2 Charakteristika textury VNV na fundus snímcích

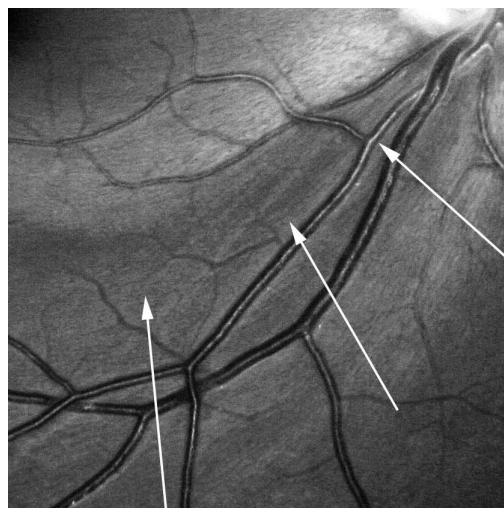
Samotný pojem textura je těžké vymezit, definovat a případně i matematicky popsat. Zjednodušeně lze za texturu považovat makroskopickou oblast, v jejíž struktuře dochází k opakování vzorů. Primitiva těchto vzorů podléhají svým umístěním jistým pravidlům [18].

Při hodnocení nervových vláken, respektive jejich ztrát na snímcích pořízených fundus kamerou, je možné subjektivně sledovat texturu jako průběh světlých proužků sbíhajících se k optickému disku. Proužková textura je nejvíce patrná právě v okolí optického disku a to hlavně podél majoritních cév. Ani v těchto místech ovšem většinou není možné vidět pruhy zcela souvislého a spojitého charakteru. Textura dalších oblastí fotografie vykazuje spíše jen směrovost v podobě jemného žíhání. Výpadek části VNV na snímcích z fundus kamery představuje tmavší oblast bez očekávané textury. Obr. 2.3 umožňuje srovnání textur obou případů.

Dalším ukazatelem ztráty nervových buněk mohou být cévy procházející oblastí bez VNV. Nervová vlákna u zdravé tkáně přecházejí i přes cévy. Přestože tento jev není ze snímků zcela patrný, v místech absence VNV vykazují cévy ostřejší ohraničení [14].



a) textura snímku zdravého oka



b) textura snímku nemocného oka
s vyznačeným výpadkem VNV

Obr. 2.3: Příklad textury ve výřezích upravených snímků

2.1.3 Kvalita fundus snímků

Pro hodnocení textury je velmi podstatná kvalita snímků. Množství informace nesené obrazovými daty primárně závisí na zorném poli fundus kamery a rozlišení snímků. Dalšími důležitými parametry je kontrast a ostrost obrazu. Ostření do různých hloubek sítnicové tkáně vede k přijímání odraženého světla z dané zaostřené roviny. Pro ostré zobrazení struktury VNV se jako nejlepší jeví ostření vnitřního povrchu sítnice [24].

Snímaný povrch sítnice má charakter konkávní kulovité plochy. Při osvětlení této plochy za účelem pořízení snímku dochází k nehomogenitě osvětlení a následkem toho ke zkreslení a ztrátě informace přijímané světlem odraženým z míst mimo přímý směr světla dopadajícího. Na fundus snímku se tento jev projeví horší kvalitou okrajových částí snímku, snížením jasu a vyšším podílem šumové složky. Tyto změny nutně vedou ke zhoršení interpretace strukturních vlastností VNV v této oblasti.

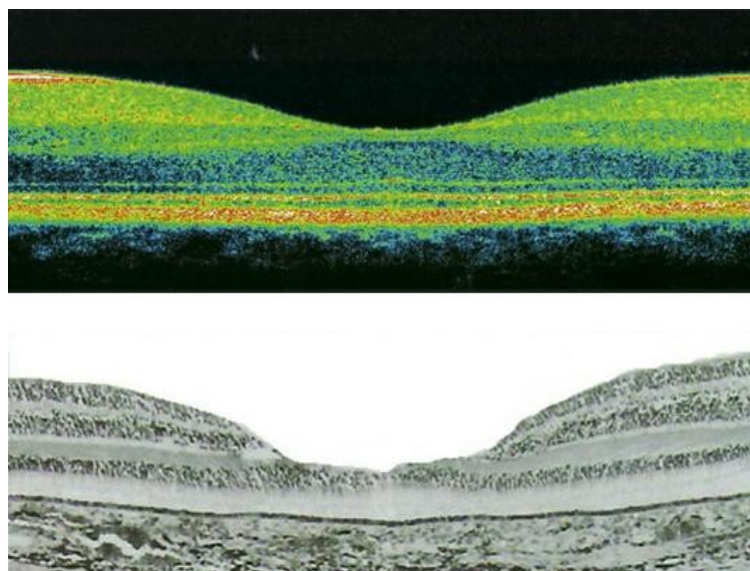
Nehomogenitu osvětlení je nutné eliminovat korekcí. V mnoha oftalmologických aplikacích se jako základní krok předzpracování používají multiplikativní akviziční modely. Jako příklad korekce nehomogenity lze uvést metodu publikovanou článkem [16]. Popisovaná metoda je založena na povrchové aproximaci dvourozměrnou plochou získanou odhadem nehomogenity v barevném fundus snímku.

2.2 Optická koherentní tomografie

OCT je lékařský diagnostický přístroj umožňující zobrazení anatomické struktury sítnice ve dvourozměrné, respektive třírozměrné podobě. Obdobně jako jsou u ultrazvukových zobrazovacích metod k rekonstrukci obrazu využívány akustické vlny, OCT snímá tkáň prostřednictvím úzce koherentního svazku infračerveného záření zaostřovaného do jednotlivých vrstev sítnice. Laserový paprsek emitovaný superluminiscenční diodou prochází zornicí a pomocí Michelsonova interferometru byly u dřívějších verzí OCT hodnoceny časové rozdíly v odrazu kontrolního paprsku od referenčního zrcadla a paprsků odražených od jednotlivých vrstev sítnice [30]. V dnešní době se však používají přístroje třetí generace, využívající analýzu spekter odražených signálů (spektrální OCT).

2.2.1 Vlastnosti dat pořízených optickou koherentní tomografií

Zobrazovací technika OCT umožňuje vizualizovat axiální řezy sítnicovou tkání a to ve vysokém rozlišení; 10-20 μm i méně [24]. Naměřená latence odrazu paprsků je barevně kódována, z jednotlivých A-skenů je následně zrekonstruován dvourozměrný obraz průřezu tkání. Barevný charakter výsledného obrazu slouží k snazší diferenciaci jednotlivých vrstev sítnice a umožňuje změřit jejich tloušťku. Vysoce reflektující tkáně se v B-skenu zobrazují červeně až bíle, naopak tkáně s nízkou mírou odrazu paprsku jsou zobrazovány modře až černě. Mezi těmito póly pak leží struktury zobrazované žlutozeleně se střední mírou reflexe světelného paprsku [30]. Typický OCT B-sken je v porovnání s histologickým řezem sítnice znázorněn na Obr. 2.4.



Obr. 2.4: Řez oblastí foveoly – OCT B-sken (nahore), histologický řez (dole), [31]

Z výsledku OCT zobrazení v podobě barevného ale i šedotónového průřezu sítnicí je možné na základě odlišnosti jednotlivých vrstev a jejich přechodů objektivně kvantifikovat tloušťku VNV (na B-skenu reprezentována jako první vrstva odshora). Mimo volby oblasti pořízení skenů, přístroje nabízí různé množství skenovacích vzorů [13]. Software pro analýzu výsledků (dodávaný spolu s přístrojem) umožňuje ve většině případů získat i nejruznější výsledky, jako je např. konstrukce retinálních či VNV tloušťkových map.

2.3 Charakteristika obrazových dat použitých k analýze

K analýze v této práci byla použita obrazová data ze dvou dostupných databází, které jsou v následujícím textu blíže popsány. Tab. 2.1 shrnuje základní charakteristiku obou databází z pohledu dat v nich obsažených. Konkrétní počty dat využitých k analýze jsou uvedeny v kapitole 4.

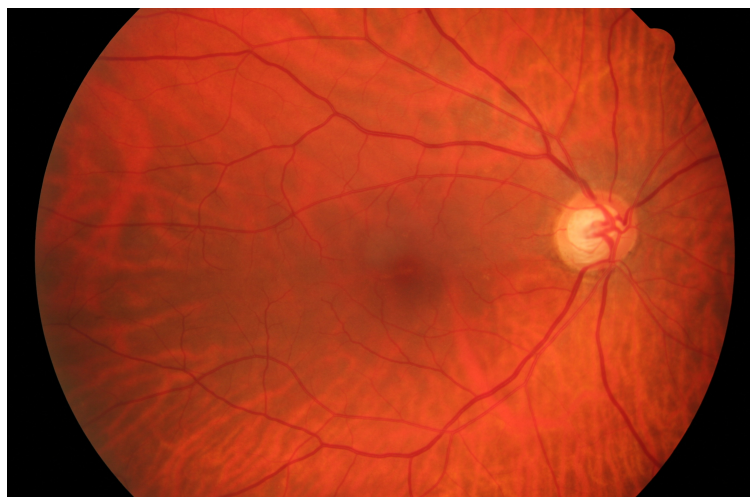
Tab. 2.1: Základní charakteristika dostupných databází

Databáze	Fundus snímky		OCT
	Snímáno bez filtru	Snímáno s modrozeleným filtrem	
ÚBMI	ANO	ANO	NE
Erlangen	ANO	NE	ANO

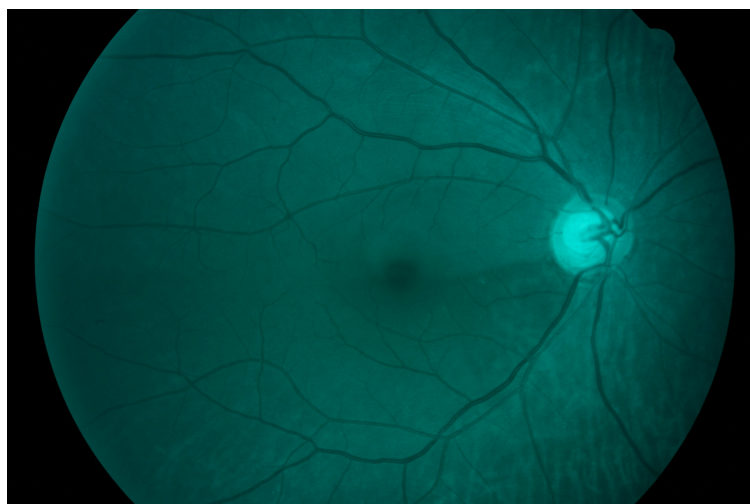
2.3.1 Databáze obrazových dat ÚBMI

Fundus snímky databáze ÚBMI pocházejí z oční ordinace MUDr. Tomáše Kuběny ve Zlíně. Byly pořízeny fundus kamerou CANON CF-60 UVi s vestavěným digitálním fotoaparátem CANON EOS-20D s nastaveným zorným polem FOV 60°. Rozlišení snímků je 3504×2336 pixelů a snímky jsou uloženy ve formátu JPEG. OCT data k fundus snímkům z této databáze prozatím nebyla dostupná.

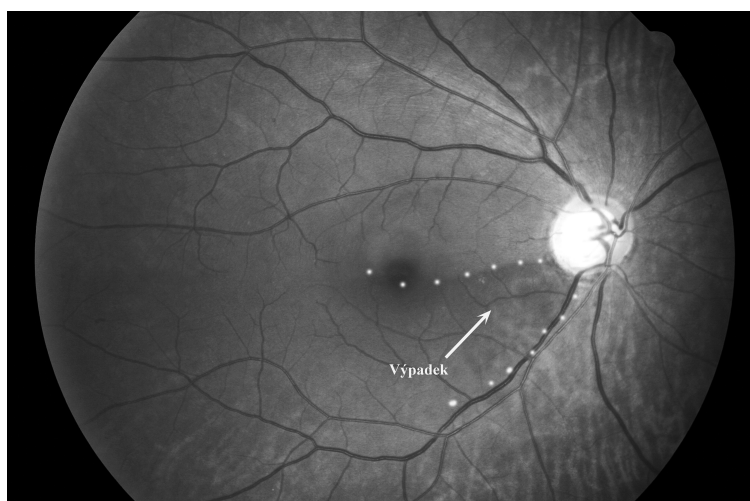
Snímky byly pořízeny za účelem hodnocení glaukomového poškození, jejich ostření tak bylo provedeno do VNV. Na základě diagnostiky jsou snímky rozděleny do skupin „zdravé oči“ a „nemocné oči“. Snímky obou skupin je možné dále rozdělit dle způsobu jejich pořízení na data získaná bez filtru BPB 45 [23] a data snímaná za pomoci filtru. Modrozelený filtr BPB 45 snímky zbavil červené složky, která o textuře VNV nepodává žádné informace (srovnání snímků viz Obr. 2.5).



a) snímek pořízený bez autofluorescenčního filtru



b) snímek pořízený přes autofluorescenční filtr



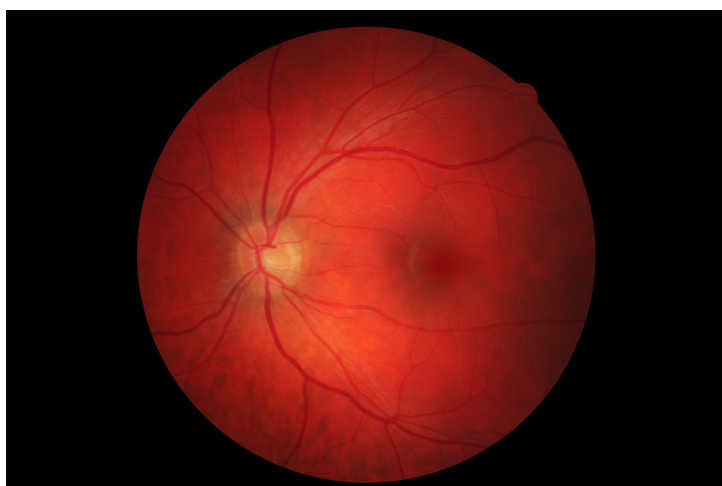
c) upravený snímek s vyznačeným výpadkem VNV

Obr. 2.5: Příklad zobrazení sítnice s defektem ve VNV z databáze ÚBMI

2.3.2 Databáze obrazových dat Erlangen

Místem pořízení snímků databáze Erlangen je Oftalmologická klinika Univerzity Erlangen-Norimberk, Německo. Ke snímání byla použita fundus kamera CANON CR-1 s vestavěnou zrcadlovkou CANON EOS 40D. Snímky s rozlišením 3888×2592 pixelů jsou uloženy ve formátu JPEG s minimální kompresí.

Fotografie jsou snímány bez použití modrozeleného filtru. Za účelem analýzy VNV je vhodné snímky upravit zprůměrováním zelené a modré složky, jak je naznačeno na Obr. 2.6. Databáze je dle přítomnosti glaukomového poškození rozdělena na snímky očí zdravých a očí nemocných.



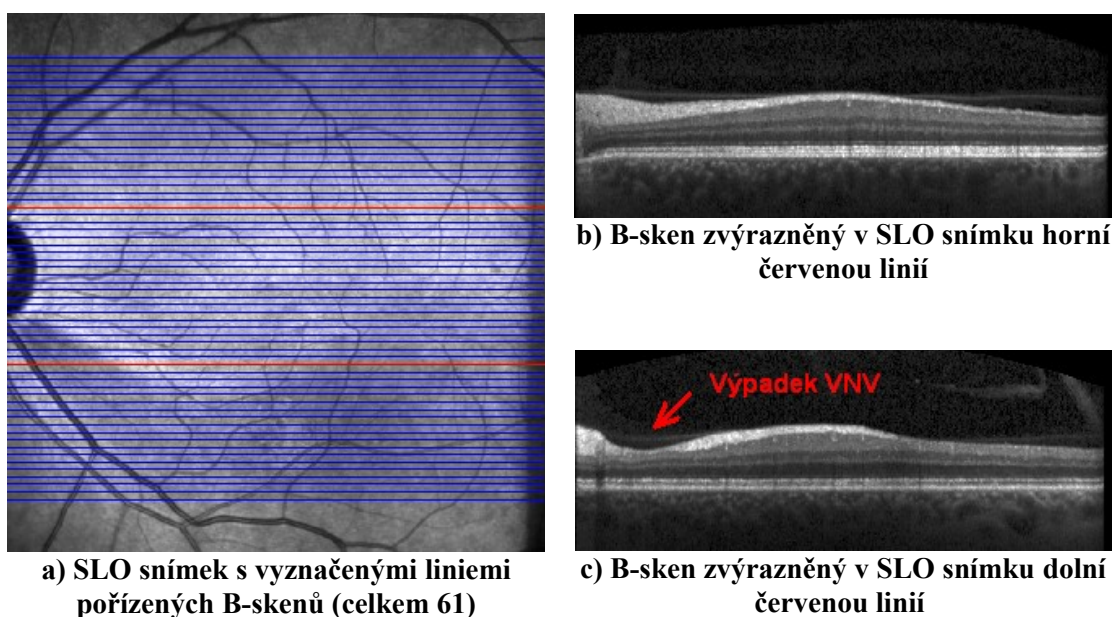
a) původní snímek (RGB)



a) upravený snímek $((G+B)/2)$

Obr. 2.6: Příklad fundus snímku zdravého oka z databáze Erlangen

Fundus snímky databáze Erlangen jsou dále doplněny odpovídajícími daty OCT. Data byla pořízena optickým koherentním tomografem SPECTRALIS® OCT (Heidelberg Engineering). Skenování OCT B-skenů bylo kombinováno spolu s vyhotovením snímků skenovací laserové oftalmoskopie (SLO – Scanning Laser Ophthalmoscopy). B-skeny jsou tak provázány se snímky SLO, které podávají doplňkové informace o sítnici a mohou sloužit jako vizuální a výpočetní vodítko pro určení polohy OCT B-skenů. Jednotlivé B-skeny jsou na každém oku vedeny ve většině případů oblastí blízkou optickému disku. Počty získaných B-skenů se pohybují v rozmezí 61-121 na snímek, tato hustota odpovídá vzdálenosti 124,3 – 63,1 μm mezi jednotlivými B-skeny. Obr. 2.7 prezentuje ukázkou OCT B-skenů včetně SLO snímku. Modré přímky na Obr. 2.7a znázorňují oblast, kterou pokrývají B-skeny.



Obr. 2.7: Příklad zobrazení sítnice s defektem ve VNV z databáze Erlangen

3 METODIKA ANALÝZY PRO HODNOCENÍ TEXTURY VNV

Metody texturní analýzy lze na základě jejich přístupu k textuře rozdělit do několika základních skupin [24]. Do skupiny první se řadí metody se strukturním přístupem, pracující s texturou jako se souborem primitiv uspořádaných v prostoru. Druhou skupinu tvoří metody založené na statistickém popisu texturních parametrů závislých na specifickém rozložení pravděpodobností nebo vzájemných vztahů mezi přidruženými pixely. Další skupina vychází z možnosti modelovat texturu na základě odhadu parametrů z předpokládaného matematického popisu. Poslední skupinou jsou metody založené na použití transformace z prostorové oblasti do oblasti koeficientů dané transformace, např. s využitím vlnkové nebo Fourierovy transformace.

K detailnímu náhledu na základní vlastnosti textury VNV bylo v rámci řešení této práce využito kvalitativního a kvantitativního úhlu pohledu. Následným vyhodnocením korelace mezi výstupy kvalitativní analýzy, prováděné formou subjektivního hodnocení textury, a kvantitativní analýzy, kdy byla data podrobena výpočetním metodám analýzy obrazu, lze ověřit vztah mezi vizuálním vjemem získaným z retinálních fotografií a základními příznaky umožňujícími matematický popis textury. V úvahu je brána také možnost do korelačních analýz zahrnout objektivní informace o tloušťce VNV získané prostřednictvím OCT, a tak ověřit efektivitu navržených texturních příznaků.

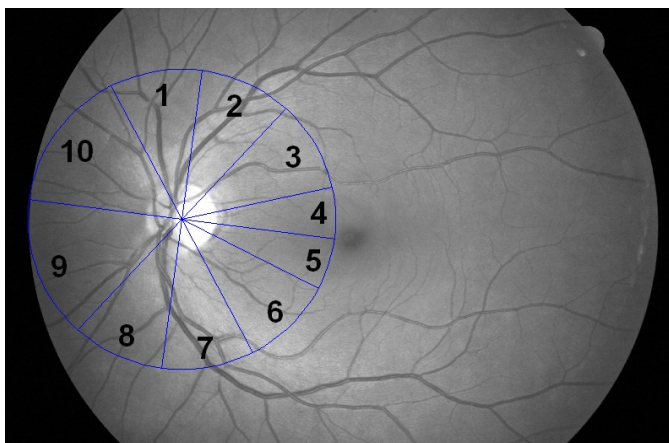
3.1 Kvalitativní texturní analýza VNV

Z poznatků o struktuře VNV a charakteru fundus snímků, které podaly kapitoly 1 a 2, lze očekávat různou interpretaci textury VNV v různých konkrétních místech snímku. Oblast v blízkosti optického disku vykazuje lepší interpretaci textury VNV z důvodu vyšší koncentrace nervových vláken z anatomického hlediska. Subjektivně se dá viditelnost textury nejlépe hodnotit temporálně od pomyslné vertikální linie procházející středem optického disku, a to přibližně do vzdálenosti maximálně dvou průměrů disku.

3.1.1 Vymezení oblasti zájmu pro účely hodnocení textury

Oblastí zájmu pro hodnocení textury VNV v této práci byla, po vzoru analýzy publikované článkem [1], zvolena oblast vymezená kružnicí se středem umístěným ve středu optického disku. Kružnice je následně rozdělena na 10 kruhových výsečí.

Práce [2], [15] zabývající se matematickým popisem trajektorie nervových vláken sítnice, jako další stěžejní bod, kromě optického disku, využívají i střed makuly. Obdobně je zamýšleno jeho využití i v této práci. Poloměr vytvořené kružnice vymežující oblast zájmu udává vzdálenost středu optického disku a středu makuly. Z vektoru daného těmito body jsou vymezeny jednotlivé sektory v podobě kruhových výsečí, znázorněných na Obr. 3.1. Jednotlivé sektory jsou číslovány a mají pevně stanovené středové úhly. Úhlem 20° jsou vymezeny výseče číslo 4 a 5, úhlem 35° výseče číslo 1, 2, 3 a 6, 7, 8. Výseče číslo 9, 10 vymezuje úhel 55° .



Obr. 3.1: Kružnice rozděluje oblast zájmu na jednotlivé sektory

3.1.2 Definování parametrů hodnotících texturu VNV

Na základě teoretických předpokladů vycházejících z poznatků o anatomických vlastnostech nervových vláken byly v rámci řešení této práce definovány parametry detailně sledující charakter textury VNV. Oblast zájmu vymezená jednotlivými sektory podle Obr. 3.1 podléhala subjektivnímu hodnocení čtyř parametrů charakterizujících přímo texturu VNV a tří parametrů souvisejících s kvalitou daného fundus snímku. Pro parametry textury bylo každému sektoru přiřazeno skóre v rozmezí 1-5 a kvalitativní parametry fundus snímků byly hodnoceny v každém sektoru skórem 1-3. Jednotlivé parametry a významy přiřazené hodnotám skóre shrnuje Tab. 3.1 a Tab. 3.2.

Tab. 3.1: Významy skóre pro parametry textury VNV

skóre	5	4	3	2	1
Směrovost textury	maximální	vysoká	nízká	minimální	beze směru
Velikost primitiv	maximální	velká	malá	minimální	nelze hodnotit
Hustota primitiv	nelze hodnotit	velmi jemná	jemná	hrubá	velmi hrubá
Pravidelnost	maximální	vysoká	nízká	minimální	nelze hodnotit

Tab. 3.2: Významy skóre pro parametry kvality fundus snímků

skóre	3	2	1
Ostrost obrazu	ostrý	rozostřený	neostrý
Úroveň jasu	maximální	střední	minimální
Šumová složka	bez šumu	nízká	vysoká

3.2 Kvantitativní texturní analýza VNV

K základnímu popisu textury je možné využít texturních statistik. Statistické metody berou v úvahu možnost příslušnou popisovanou texturu charakterizovat na základě výpočtů z matice vzájemného výskytu úrovní šedi v obraze.

Texturní statistiky jsou dále klasifikovány podle počtu pixelů, se kterými pracují, na statistiky prvního a druhého řádu [3]. Statistiky 1. řádu se vztahují k margiálnímu rozložení úrovně šedi, zatímco statistiky 2. řádu charakterizují interakce mezi dvěma pixely.

Přístup statistik prvního řádu je poměrně jednoduchý, přesto cíleně vystihuje základní pohled na texturní vlastnosti obrazu. Výpočet statistik prvního řádu vychází z funkce odhadující pravděpodobnost výskytu určitého pixelu v obraze. Funkce – označována $H(g)$ vychází z jednorozměrného histogramu, který je pro šedotónový obraz definován jako [3]:

$$H(g) = \frac{n_g}{N}; \quad g = 0, 1, \dots, G-1, \quad (3.1)$$

kde N je počet všech pixelů v obraze, G je počet úrovní šedi a n_g označuje počet pixelů s hodnotou g v obraze (vztahuje se i k vzorcům uvedeným dále).

Odhady texturních charakteristik 1. řádu zahrnují dle článku [3], pojednávajícího

o metodách popisu textury lékařských obrazů, celkem pět parametrů: střední hodnotu (μ), směrodatnou odchylku (σ), šikmost (S), energii (Eng), entropii (Ent). Pro popis textury VNV byly v rámci této práce počítány jmenované příznaky s následujícími vzorci [3]:

$$\mu = \sum_{g=0}^{G-1} g H(g), \quad (3.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{g=0}^{G-1} (g - \mu)^2 H(g)}, \quad (3.3)$$

$$S = \frac{\sum_{g=0}^{G-1} (g - \mu)^3 H(g)}{\sigma^3}, \quad (3.4)$$

$$Eng = \sum_{g=0}^{G-1} H^2(g), \quad (3.5)$$

$$Ent = - \sum_{g=0}^{G-1} H(g) \log_2(H(g)). \quad (3.6)$$

3.3 Ověření účinnosti použitých metod

K vyhodnocení úspěšnosti popsaných kvantitativních metod texturní analýzy se nabízí možnost výpočtů korelace jejich výstupů s výstupy subjektivního hodnocení, a především s dostupnými obrazovými daty OCT, které lze považovat do jisté míry za zlatý standard, díky možnosti kvantitativního mapování tloušťky VNV. Článek [10] popisuje statistické srovnání závislosti subjektivně viditelných výpadků VNV na fundus snímcích s kvantitativně změřenou tloušťkou VNV pomocí OCT, ovšem jen z medicínského hlediska, bez jakékoli automatické analýzy. Výpočet míry korelace tloušťky VNV stanovené z OCT obrazových dat a výsledku automatické analýzy textury VNV navrhovanými metodami na fundus snímcích by mohl umožnit objektivní zhodnocení použitých metod a potvrzení předpokladu závislosti změn v textuře VNV na odpovídajících objektivně změřených změnách tloušťky VNV.

3.3.1 Korelační analýza

Hodnocením korelace se zabývá tzv. vícerozměrná statistika, konkrétně její část korelačních a regresních analýz. Na rozdíl od regresních analýz, zjišťujících přímo vztah mezi proměnnými, se korelační analýza zabývá popisem síly vzájemné lineární závislosti mezi sledovanými proměnnými. Mezi proměnnými mohou existovat dva základní typy vztahu. Prvním typem je závislost funkční, která podléhá určitému zápisu v podobě rovnice a často se s ní lze setkat v exaktních vědách. Dalším typem je korelační závislost, jejíž určování je typické pro popis statistických vztahů v biologii a lékařství. Z důvodu nestálého charakteru sledovaných proměnných v těchto oborech neexistuje funkční zápis jejich vztahu; korelační závislost je relativní [29].

Korelační vztah lze vyjádřit bodovým diagramem. Každý bod v tomto grafu reprezentuje jednu z n sledovaných korelačních dvojic (x_i, y_i) , $(i = 1, \dots, n)$ [27]. Podle charakteru rozložení všech bodů v grafu je možné odhadovat sílu lineární závislosti proměnných. Body rozložené rovnoměrně po celé ploše grafu ukazují na velmi slabou nebo žádnou lineární závislost. Naopak body soustředěné do blízkosti pomyslného průběhu lineární závislosti lze považovat za ukazatel silného stupně asociace obou proměnných (viz Obr. 3.2).

3.3.2 Korelační koeficient

K měření korelace existuje řada navržených koeficientů. Liší se podle typu proměnných, které jejich výpočtům podléhají. Standardně klasický párový koeficient je označován jako Pearsonův, podle K. Pearsona, který v roce 1920 precizoval základní myšlenky F. Galtona z roku 1888 [19]. Zpřesnění Galtonových jednoduchých poznatků o korelaci vedlo k zavedení korelačního koeficientu, opírajícího se o teorii pravděpodobnosti pro společné rozdělení dvou nebo více náhodných proměnných.

Pearsonův korelační koeficient se počítá z n korelačních dvojic (x_i, y_i) , $(i = 1, \dots, n)$. Za podmínky normálního rozdělení obou náhodných proměnných X, Y je možné k výpočtu Pearsonova korelačního koeficientu r využít vztah [29]:

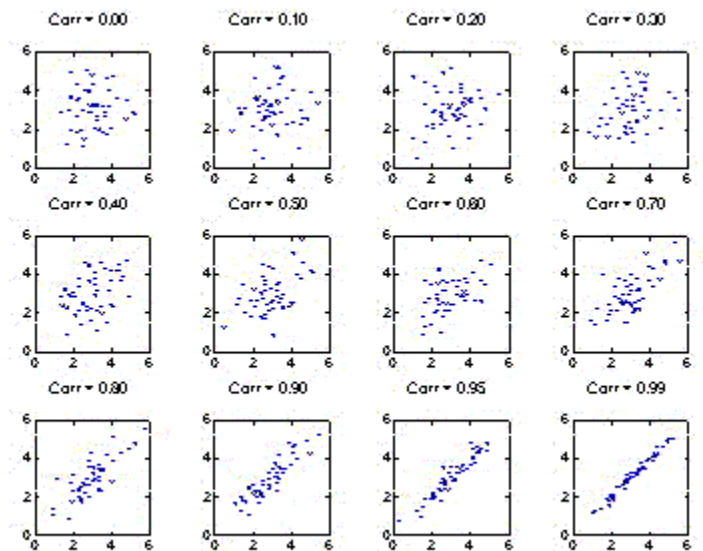
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.7)$$

kde $r \in \langle -1; 1 \rangle$. Kladná hodnota r , zjištěného z rovnice (3.7), znamená pozitivní korelaci, záporná korelaci negativní. Čím větší je absolutní hodnota koeficientu, tím je míra korelace těsnější. Při $r = 0$ korelace mezi zkoumanými proměnnými X , Y neexistuje, veličiny jsou na sobě lineárně nezávislé [29]. Obr. 3.2 názorně ilustruje grafické zobrazení míry korelace pro různé hodnoty korelačního koeficientu.

Graficky je možné charakter korelace doprovodně zobrazit regresní přímkou. Korelační koeficient je svázán se směrnici regresní přímky b následujícími vztahy [19]:

$$b = r \frac{s_y}{s_x}; \quad r = b \frac{s_x}{s_y}, \quad (3.8)$$

kde s_x je směrodatná odchylka proměnné X a s_y , směrodatná odchylka proměnné Y .



Obr. 3.2: Příklady grafického zobrazení míry korelace pro různé hodnoty korelačního koeficientu, [32]

4 POUŽITÍ NAVRŽENÉ METODIKY PRO HODNOCENÍ TEXTURY VNV

4.1 Předzpracování vstupních obrazových dat

4.1.1 Rozdělení analyzovaných dat

Z databáze ÚBMI byly v rámci této práce přednostně využity snímky snímané přes modrozelený filtr BPB 45, u kterých se očekává lepší interpretace textury VNV. Z databáze Erlangen podléhaly analýzám veškeré dostupné fundus fotografie. Celkové počty analyzovaných snímků shrnuje Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Počty analyzovaných fundus snímků

	Zdarvé oči	Nemocné oči
Databáze ÚBMI	18	27
Databáze Erlangen	31	14
Snímků celkem	49	41

Jednotlivé snímky z každé ze čtyř skupin (data ÚBMI – zdravá, data ÚBMI – nemocná, data Erlangen – zdravá, data Erlangen – nemocná) byly označeny podle stranové orientace – levé oko: $L1, L2, \dots, Lx$; pravé oko: $R1, R2, \dots, Rx$ (pro x pacientů dané skupiny). Snímky byly zprůměrováním modré a zelené složky obrazu převedeny do šedotónové podoby pro lepší interpretaci textury VNV.

4.1.2 Definování oblastí zájmu pro účely hodnocení textury

Dle podkapitoly 3.1.1 byla na každém snímku vytvořena maska sektorů kolem optického disku. Manuální určení středu optického disku následovalo rovněž

manuální určení středu makuly. V závislosti na konkrétních prostorových rozmístěních v rámci daného snímku, byl střed makuly často intuitivně posunut blíže k optickému disku, aby vytvořená kružnice nezasahovala mimo snímek a pojala požadované množství texturní informace. Vzdálenost zvolených bodů udává poloměr kružnice, vektor daný těmito body je určen jako nulový úhel pro dopočítání středových úhlů požadovaných výsečí. Masky v podobě kružnice rozdělené na sektory se přímo do snímku automaticky vykreslí.

4.1.3 Tvorba datových souborů se vzorky textury VNV

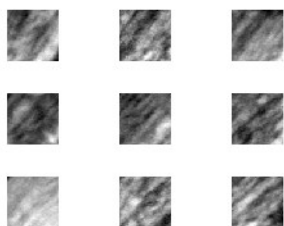
Pro automatickou texturní analýzu je ze snímků nezbytné vybrat vzorky textury, které budou následně analýze podléhat. Tyto vzorky je nutné vybírat manuálně, tak aby obsahovaly pouze texturní části obrazu, a aby do nich nezasahovaly zásobovací cévy a jiné struktury na sítnici.

Pro obrazová data z databáze ÚBMI byla vytvořena sada vzorků velikých 67×67 pixelů. Dataset vytvořený pro databázi Erlangen obsahuje vzorky o velikosti 77×77 pixelů. Výběr vzorků zohledňoval rozmístění sektorů předem definovaných pro subjektivní hodnocení textury. Vzorky z každé fundus fotografie byly tříděny do 10 skupin podle příslušnosti k sektoru. Každý vzorek byl uložen společně se souřadnicemi, které mu v původním obraze náleží, pro možnost zpětného dohledání polohy vzorku, například za účelem konfrontace s příslušnými informacemi z OCT dat. Průměrně bylo z jednoho snímku vybráno 73 vzorků textury. Celkové počty vzorků vybraných k analýzám shrnuje Tab. 4.2.

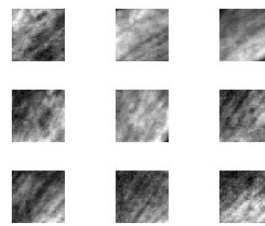
Tab. 4.2: Celkové počty vybraných vzorků textury VNV

	Zdarvé oči		Nemocné oči	
	Snímků	Vzorků	Snímků	Vzorků
Databáze ÚBMI	18	1305	27	2100
Databáze Erlangen	31	2111	14	1012
Celkem	49	3416	41	3112

Při výběru docházelo výjimečně k překrývání jednotlivých vzorků, které nepřevyšovalo cca čtvrtinovou velikost okna výběru. V místech viditelných výpadků VNV byly vzorky citlivě voleny výhradně do výpadku, anebo výhradně do místa se zachovanou texturou VNV, tak aby neobsahovaly částečně oba případy. Ukázku výběru vzorků ilustruje Obr. 4.1 a 4.2.

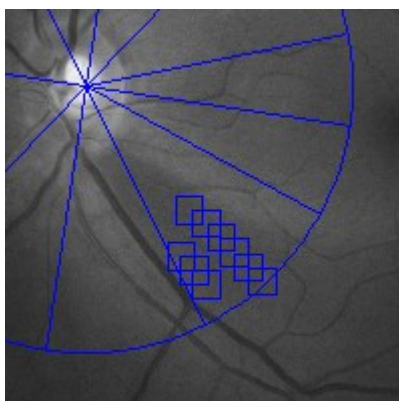


a) vzorky pro oko L7 ze skupiny data
ÚBMI – zdravá

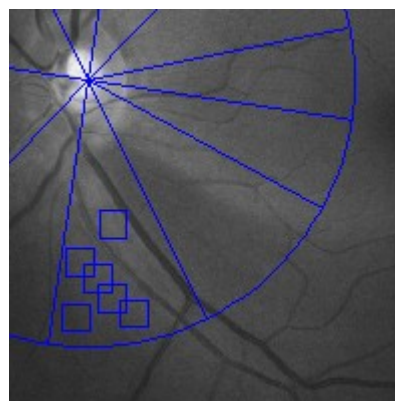


b) vzorky pro oko L12 ze skupiny data
Erlangen – zdravá

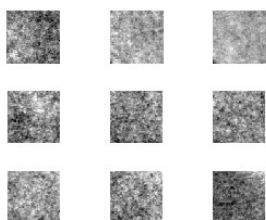
Obr. 4.1: Příklad vzorků ze sektoru č. 2 ze skupin zdravých očí



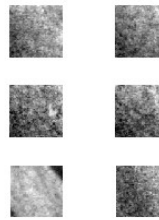
a) výběr vzorků
z viditelného výpadku ve VNV



b) výběr vzorků
ze zachované tkáně nemocného oka



c) vykreslené vzorky pro výběr podle (a)



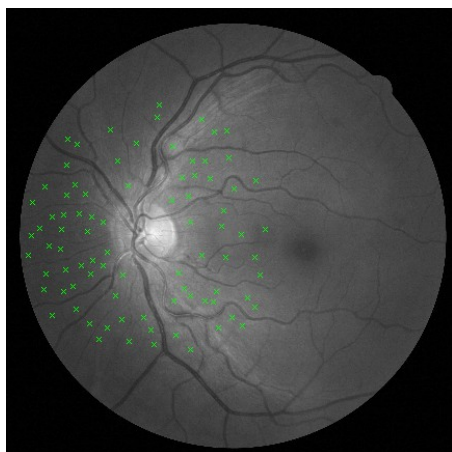
d) vykreslené vzorky pro výběr podle (b)

Obr. 4.2: Vzorky ze sektorů č. 6 a 7 pro oko L7 ze skupiny data Erlangen – nemocná

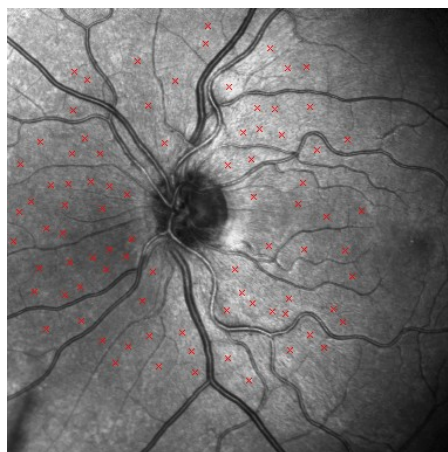
4.1.4 Přepočet souřadnic vybraných vzorků z fundus snímku do tloušťkové mapy z OCT

Konkrétní charakteristiky dostupných OCT dat vedly k redukci dostupných fundus snímků v databázi Erlangen na základě použitelnosti k navržené metodice analýzy. Data z OCT byla již dříve předzpracována na základě analýzy publikované v [17] a byla tak dostupná v požadované formě na Ústavu biomedicínského inženýrství, FEKT, VUT v Brně. V rámci tohoto předzpracování bylo potřeba provést registraci fundus obrazů a korespondujících OCT B-skenů, provést segmentaci VNV v B-skenech a extrahovat dvourozměrnou tloušťkovou mapu VNV. Pro analýzu bylo tedy dále vybráno pouze 19 fundus snímků zdravých očí a 4 snímky očí nemocných. Pro ostatní snímky z dostupné databáze nebyla OCT data k dispozici v žádoucí podobě, např. k nim nebyla dostupná požadovaná registrační data, oblast vytvořené tloušťkové mapy na SLO neodpovídala oblasti zájmu na fundus snímku, případně nebyla segmentovaná VNV v B-skenech, a tak chyběla tloušťková mapa k dohledání příslušné informace o tloušťce VNV.

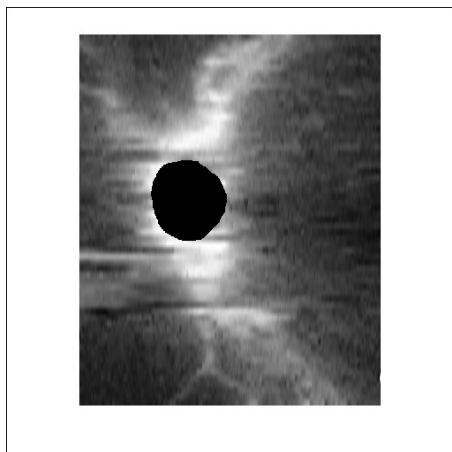
U snímků vybraných k analýze bylo nutné přepočítat souřadnice vybraných vzorů z originálního fundus snímku do SLO snímku s využitím dostupných registračních parametrů (konkrétně použité transformační funkce) [17]. V dalším kroku byly souřadnice přepočítány do tloušťkové mapy nesoucí informaci o tloušťce VNV na konkrétní pozici souřadnic. Vzhledem ke skutečnosti, že tloušťková mapa nepokrývá celý SLO snímek, některé souřadnice vzorků z originálního fundus snímku nemohou být přepočítány; některé z vybraných vzorků tedy není možné brát pro nadcházející korelační analýzu v úvahu. V Tab. 4.3 jsou tak uvedeny nové počty snímků a vzorků, které je možně podrobit korelační analýze (fundus-OCT) s využitím informace o tloušťce VNV. Na Obr. 4.3 je znázorněn postup dohledání konkrétních souřadnic v tloušťkové mapě a jejich zpětný přepočet naznačen na reálném snímku.



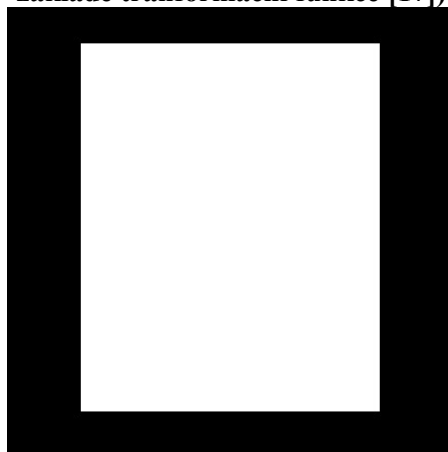
a) pozice všech vybraných vzorů na originálním fundus snímku



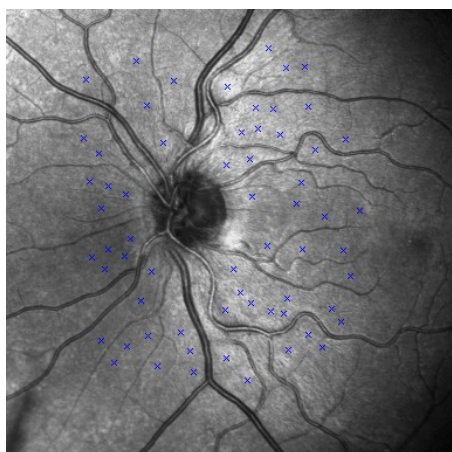
b) pozice všech vzorků přepočtených na korespondující místa do SLO snímku (na základě transformační funkce [17])



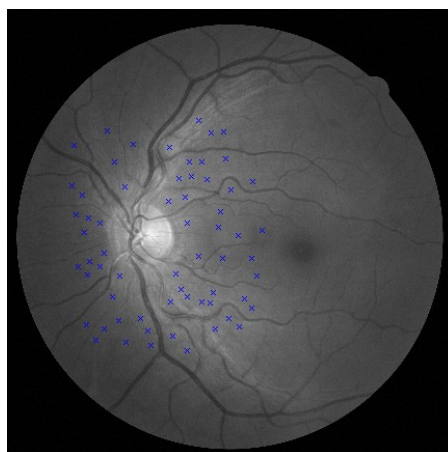
c) příslušná tloušťková mapa VNV (extrahováno s OCT B-skenů pomocí metody popsané v [17])



d) binární mapa - oblast, kterou tloušťková mapa pokrývá SLO snímek (extrahováno z OCT dat)



e) vzorky, jejichž souřadnice korespondují s binární mapou (existují k nim souřadnice v tloušťkové mapě)



f) pozice vzorků, ke kterým existuje informace o tloušťce, zobrazené zpět v originálním fundus snímku

Obr. 4.3: Postup redukce vzorků na základě dostupných korespondujících OCT dat.

Tab. 4.3: Počty snímků a vzorků využitých k multimodální analýze

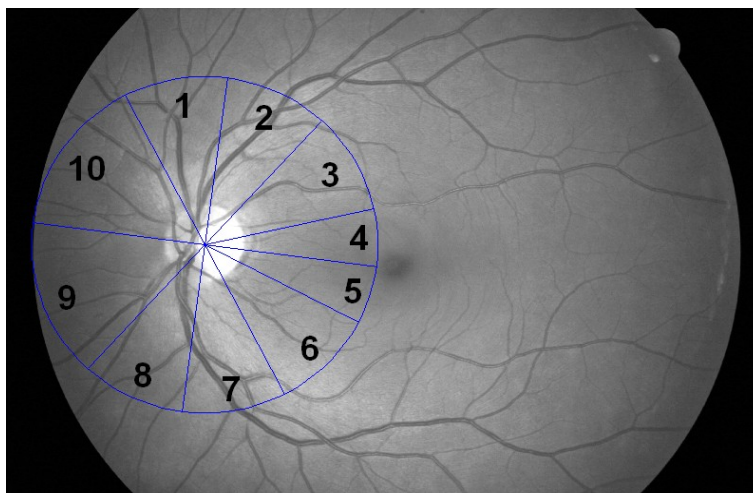
	Zdarvé oči		Nemocné oči	
	Snímků	Vzorků	Snímků	Vzorků
Celkem v databázi	18	1305	27	2100
K multimodální analýze	31	2111	14	1012
Po selekci vzorků	49	3416	41	3112

4.2 Texturní analýza VNV

4.2.1 Subjektivní hodnocení textury VNV v okolí optického disku

V masce sektorů, pevně číslovaných podle Obr. 4.4, byly hodnoceny předdefinované parametry dle Tab. 3.1 a Tab. 3.2. Kompletní hodnocení všech parametrů proběhlo na snímcích zdravých očí, u kterých se předpokládá plné zachování textury. Snímky nemocných očí byly následně analyzovány pouze hodnocením parametru úrovně jasu v souvislosti s nadcházejícími analýzami korelace (viz podkapitola 4.3). Původní tabulky hodnocení pro sektory všech snímků jsou uvedeny v přílohách A, B a C. V Tab. 4.4 a Tab. 4.5 jsou zaznamenány jen průměrné hodnoty skóre pro jednotlivé sektory fundus snímků zdravých očí. Tab. 4.6 prezentuje hodnocení fotografií očí nemocných. Tučné hodnoty vypovídají o sektoru s nejlepším, resp. nejhorším vizuálním hodnocením parametru.

Pro parametry kvality fundus snímků byly uvažovány nejen průměry počítané pro jednotlivé sektory, ale i průměry hodnot pro každý snímek. Výsledky těchto výpočtů lze považovat za subjektivní označení kvality jednotlivých snímků. Průměry pro jednotlivé snímky jsou zaznamenány v původních tabulkách uvedených v příloze A a B.



Obr. 4.4: Maska sektorů pro hodnocení textury VNV

Tab. 4.4: Průměrná skóre jednotlivých sektorů pro zdravé snímky ÚBMI

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
Směrovost textury	2,83	4,00	2,33	1,33	1,06	2,17	2,94	1,39	1,00	1,67
Velikost primitiv	3,06	4,50	2,22	1,22	1,17	2,67	3,06	1,44	1,00	1,72
Hustota primitiv	2,89	1,89	3,72	4,72	4,89	3,83	2,94	4,78	5,00	4,22
Pravidelnost	3,06	3,78	3,61	1,67	1,11	2,72	2,89	1,44	1,06	1,44
Ostrost obrazu	2,56	2,56	2,11	1,50	1,39	2,11	2,22	2,17	2,17	2,33
Úroveň jas u	1,89	2,83	2,00	1,89	1,94	2,44	2,78	2,06	1,06	1,17
Šumová složka	2,61	2,72	2,78	2,33	2,33	2,72	2,67	2,72	2,72	2,39

Tab. 4.5: Průměrná skóre jednotlivých sektorů pro zdravé snímky Erlangen

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
Směrovost textury	2,83	4,00	2,33	1,33	1,06	2,17	2,94	1,39	1,00	1,67
Velikost primitiv	3,06	4,50	2,22	1,22	1,17	2,67	3,06	1,44	1,00	1,72
Hustota primitiv	2,89	1,89	3,72	4,72	4,89	3,83	2,94	4,78	5,00	4,22
Pravidelnost	3,06	3,78	3,61	1,67	1,11	2,72	2,89	1,44	1,06	1,44
Ostrost obrazu	2,56	2,56	2,11	1,50	1,39	2,11	2,22	2,17	2,17	2,33
Úroveň jas u	1,89	2,83	2,00	1,89	1,94	2,44	2,78	2,06	1,06	1,17
Šumová složka	2,61	2,72	2,78	2,33	2,33	2,72	2,67	2,72	2,72	2,39

Tab. 4.6: Průměrná skóre úrovně jas u pro nemocné snímky

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
Úroveň jas u ÚBMI	1,44	2,52	2,07	2,00	1,93	1,93	2,41	1,41	1,00	1,00
Úroveň jas u Erlangen	1,71	2,14	2,43	1,79	1,86	2,07	2,07	1,64	1,36	1,21

4.2.2 Výpočet kvantitativních texturních příznaků VNV

Pro základní kvantitativní analýzu textury VNV byly z texturních příznaků definovaných v podkapitole 3.2 vybrány tři příznaky – konkrétně střední hodnota μ , směrodatná odchylka σ a entropie Ent . Veškeré vybrané vzorky podléhaly výpočtům dle vzorců (3.2), (3.3) a (3.6). V Tab. 4.7 - 4.10 jsou zaznamenány průměrné hodnoty příznaků v jednotlivých sektorech v rámci celých skupin dat, s tučně vyznačenými nejvyššími a nejnižšími hodnotami daného příznaku.

Tab. 4.7: Průměrné hodnoty texturních příznaků pro data ÚBMI - zdravá

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
Střední hodnota	73,77	92,20	88,81	82,41	84,04	96,43	93,52	68,45	48,83	54,89
Směrodatná odchylka	2,85	4,34	2,72	2,31	2,44	3,26	3,72	2,45	1,63	1,94
Entropie	3,73	4,23	3,58	3,44	3,50	3,83	4,13	3,74	3,15	3,38

Tab. 4.8: Průměrné hodnoty texturních příznaků pro data Erlangen - zdravá

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
Střední hodnota	31,45	40,48	42,50	40,19	40,10	45,97	37,58	27,78	22,40	24,27
Směrodatná odchylka	1,97	2,83	2,11	1,95	1,86	2,34	2,60	1,70	1,18	1,33
Entropie	3,11	3,60	3,21	3,23	3,15	3,38	3,51	3,01	2,56	2,71

Tab. 4.9: Průměrné hodnoty texturních příznaků pro data ÚBMI - nemocná

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
Střední hodnota	69,09	80,19	81,00	76,93	76,73	82,46	79,09	66,07	52,77	56,09
Směrodatná odchylka	2,11	2,81	2,11	1,88	1,88	2,29	2,36	1,95	1,52	1,70
Entropie	3,30	3,58	3,20	3,18	3,13	3,31	3,50	3,34	3,01	3,07

Tab. 4.10: Průměrné hodnoty texturních příznaků pro data Erlangen - nemocná

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
Střední hodnota	32,08	35,89	38,00	35,79	36,20	39,62	38,69	33,24	29,67	28,91
Směrodatná odchylka	1,49	1,73	1,54	1,36	1,37	1,54	1,70	1,54	1,24	1,25
Entropie	2,68	2,90	2,83	2,76	2,75	2,81	2,91	2,78	2,58	2,56

4.3 Hodnocení výstupů texturní analýzy

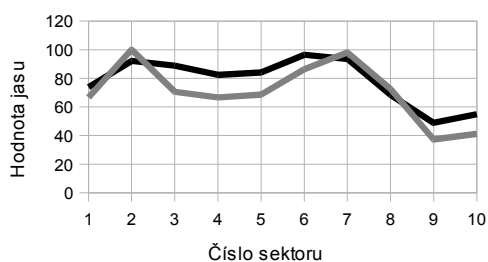
Základním motivem pro zkoumání míry korelace jednotlivých výsledků texturní analýzy je snaha definovat příznaky (získané výpočetní metodou), které by informaci o obrazové textuře VNV popisovaly kvalitativně v souladu s vizuálně vnímaným charakterem textury i kvantitativně s ohledem na objektivní informaci o morfologii VNV (tloušťku VNV). Bodem, ze kterého tyto dva přístupy vychází, je skutečnost, že texturní informace interpretovaná fotografií sítnice s vysokým rozlišením je různá v různých místech snímku. Obdobně tloušťka VNV se na základě anatomického uspořádání nervových vláken v různých místech sítnice charakteristicky mění.

Následující podkapitoly prezentují detailní pohled na souvislosti a závislosti mezi subjektivním hodnocením textury VNV, příznaky textury popisované základními statistickými přístupy i mezi objektivně měřenou tloušťkou VNV. V úvahu byla brána data pořízená na tkáni zdravé i poškozené v důsledku glaukomového onemocnění. Celé hodnocení korelačních vlastností zkoumaných parametrů bylo provedeno v několika krocích, od subjektivního zamyšlení po kvantitativní výpočty koeficientů korelace.

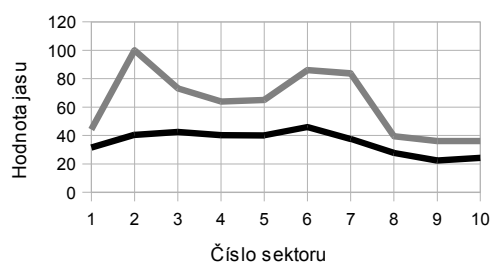
4.3.1 Základní subjektivní porovnání výsledků texturní analýzy

V prvním kroku bylo porovnání subjektivního a kvantitativního hodnocení textury provedeno formou 1D grafů, do kterých byly vykresleny křivky obou parametrů (subjektivního – úroveň jasu, základního kvantitativního – střední hodnota/směrodatná odchylka/entropie) napříč sektory. Dle vizuálně zjištěného průběhu grafů je možné subjektivně hodnotit vzájemné závislosti mezi oběma parametry a jejich charakteristické kolísání napříč sektory, tedy kolem optického disku dle předpokládaného kolísání fyziologické tloušťky VNV.

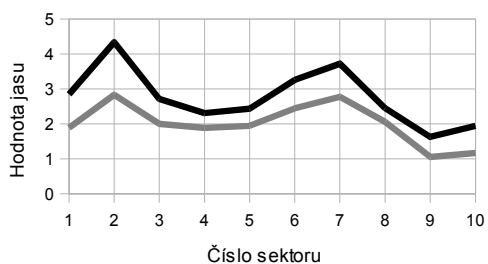
Grafické srovnání znázorňuje Obr. 4.5 pro zdravá data a Obr. 4.6 pro data nemocná. Hodnoty subjektivních parametrů úrovně jasu pro zdravá data jsou v Tab. 4.4 a 4.5. zvýrazněny v řádku, pro nemocná data prezentovány v Tab. 4.6. Kompletní hodnoty kvantitativních parametrů viz Tab. 4.7 - 4.10. Subjektivní parametr střední hodnoty byl pro účely lepšího zobrazení převzorkován na rozsah 0-100 (případně 0-50). Hodnoty byly děleny maximální hodnotou a následně násobeny koeficientem 100 (50).



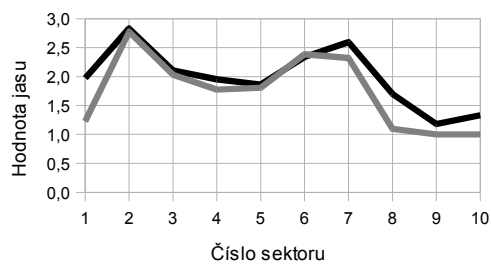
a) střední hodnota jasu – data ÚBMI



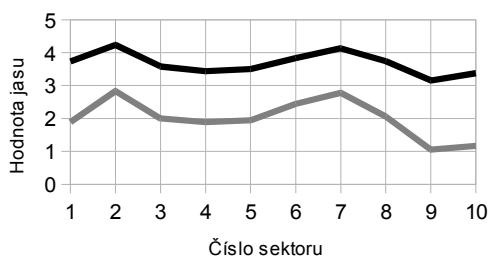
b) střední hodnota jasu – data Erlangen



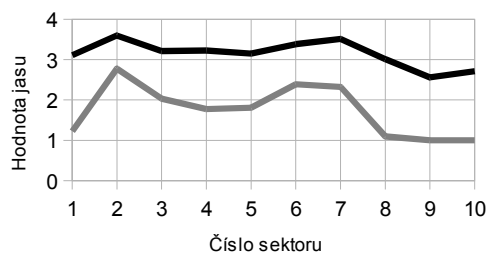
c) směrodatná odchylka jasu – data ÚBMI



d) směrodatná odchylka jasu – data Erlangen



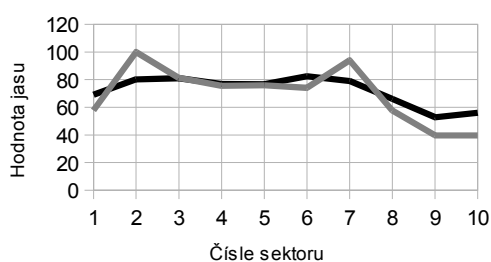
e) entropie – data ÚBMI



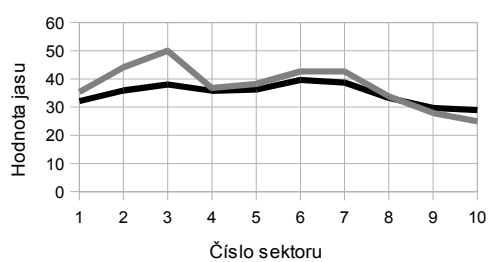
f) entropie – data Erlangen

— Kvantitativní parametr — Subjektivní parametr

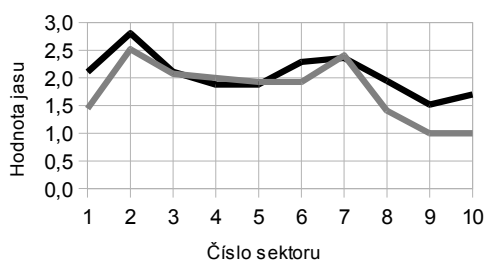
Obr. 4.5: Grafické srovnání subjektivního a kvantitativního hodnocení textury pro zdravá data



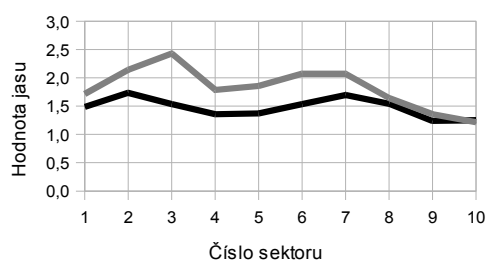
a) střední hodnota jasu – data ÚBMI



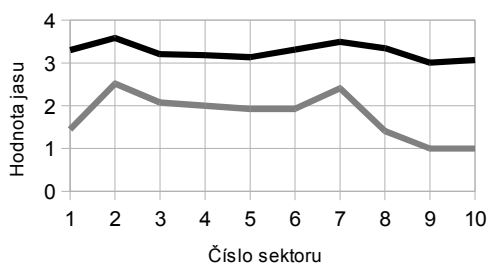
b) střední hodnota jasu – data Erlangen



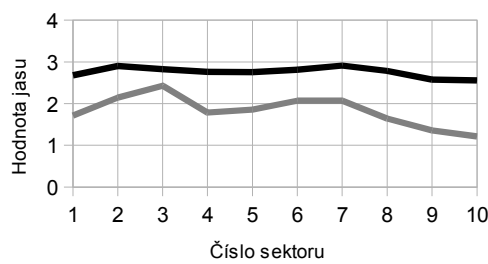
c) směrodatná odchylka jasu – data ÚBMI



d) směrodatná odchylka jasu – data Erlangen



e) entropie – data ÚBMI



f) entropie – data Erlangen

— Kvantitativní parametr — Subjektivní parametr

Obr. 4.6: Grafické srovnání subjektivního a kvantitativního hodnocení textury pro nemocná data

4.3.2 Výpočet korelačních koeficientů

Kvantitativní hodnocení míry korelace výstupů texturní analýzy bylo provedeno prostřednictvím výpočtů korelačních koeficientů. Dle teoretických poznatků o korelačních koeficientech, popsanych v podkapitole 3.4.2, byla sledovanými proměnnými v tomto případě určena hodnota subjektivního parametru (úroveň jasu)

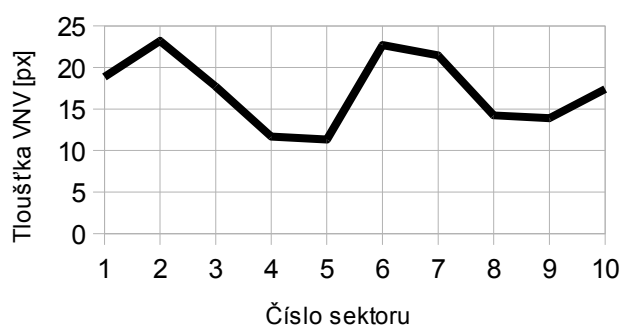
jako proměnná X , a hodnota kvantitativního parametru (střední hodnota/směrodatná odchylka/entropie) jako proměnná Y . Vzhledem ke skutečnosti, že subjektivní hodnocení je reprezentováno jednočíselným výstupem (skórem) pro celý hodnocený sektor, byly u kvantitativních parametrů brány v úvahu průměrné hodnoty texturních příznaků ze vzorků počítané v rámci jednotlivých sektorů. Tab. 4.11 prezentuje výsledky korelační analýzy jako míru korelace mezi vizuálním vjemem textury VNV z fundus snímku a základními texturními příznaky VNV, které je možné kvantitativně spočítat. Zvýrazněné hodnoty v tabulce poukazují na nejlépe korelující kvantitativní parametr v rámci dané skupiny obrazových dat.

Tab. 4.11: Korelační koeficienty pro subjektivní parametr úrovně jasu a základní kvantitativní příznaky textury VNV

	Zdarvé oči		Nemocné oči	
	ÚBMI	Erlangen	ÚBMI	Erlangen
Střední hodnota jasu	0,75	0,61	0,65	0,61
Směrodatná odchylka jasu	0,74	0,61	0,62	0,52
Entropie	0,71	0,58	0,49	0,46

4.3.3 Multimodální přístup korelační analýzy zahrnující OCT data

Dle postupu popsaném v podkapitole 4.1.4 byly ke vzorkům vybraných snímků z databáze Erlangen dohledány příslušné hodnoty tloušťky VNV. Získané tloušťky vzorků (VNV) byly v prvním kroku zprůměrovány na pozicích v rámci jednotlivých sektorů. Z těchto zprůměrovaných hodnot bylo pro data zdravých očí graficky znázorněno kolísání tloušťky VNV kolem optického disku (viz Obr. 4.7), podobně jako byly sledovány měnící se hodnoty texturních příznaků napříč sektory v předchozí podkapitole 4.3.1. Pro toto zobrazení byla brána v úvahu pouze data zdravých očí, u kterých je VNV zachována v plné své tloušťce.



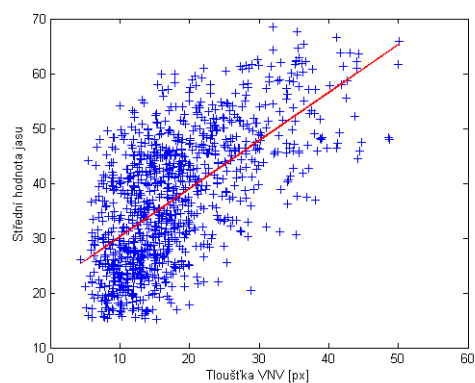
Obr. 4.7: Graf kolísání tloušťky VNV napříč sektory (pro data zdravých očí)

Soubor statistických příznaků popisujících texturu VNV byl u fundus snímků podléhajících multimodální analýze doplněn o výpočty šikmosti S a energie Eng podle vzorců (3.4) a (3.5). Výstupy výpočtů všech pěti texturních příznaků (střední hodnota jasu, směrodatná odchylka jasu, šikmost, energie a entropie) a subjektivního hodnocení byly podrobeny zjišťování míry korelace s objektivně změřenou tloušťkou VNV. V Tab. 4.12 jsou zaznamenány výsledné hodnoty korelačních koeficientů, tučně zvýrazněný je v tabulce příznak s nevyšší hodnotou koeficientu.

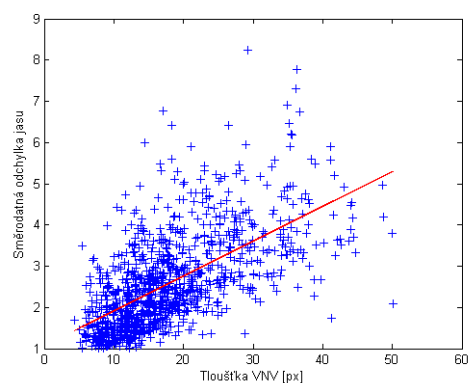
Závislosti jednotlivých kvantitativních příznaků a tloušťky VNV (v pixelech) byly vyneseny do korelačních diagramů (viz Obr. 4.8 pro oči zdravé a Obr. 4.9 pro oči nemocné. Jednotlivé grafy byly dále proloženy regresními přímkami, jejichž směrnice jsou s korelačními koeficienty svázány pomocí vztahů (3.8).

Tab. 4.12: Korelační koeficienty pro tloušťku VNV a výstupy texturní analýzy VNV

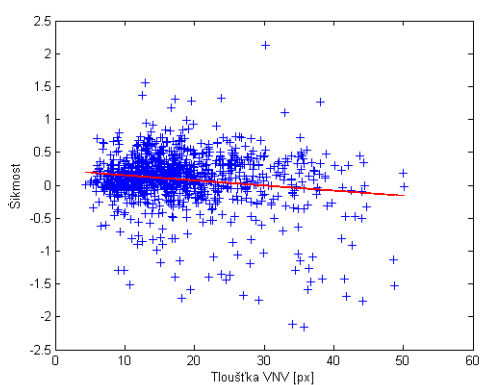
	Zdravé oči	Nemocné oči
Subjektivní hodnocení – úroveň jasu (hodnoty průměrovány v rámci sektorů)	0,40	0,25
Střední hodnota jasu	0,62	0,35
Směrodatná odchylka jasu	0,63	0,59
Šikmost	-0,16	-0,09
Energie	-0,60	-0,57
Entopie	0,64	0,59



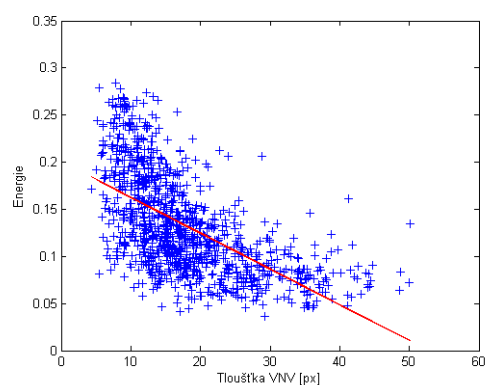
a) Střední hodnota jasu ($r = 0,62$)



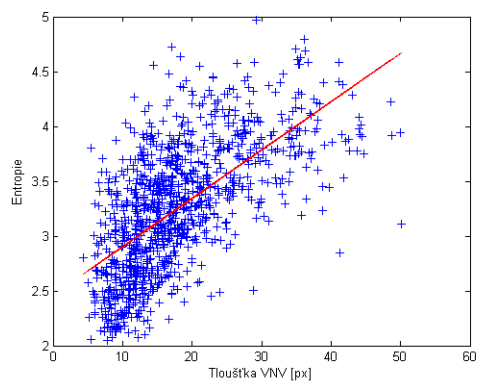
b) Směrodatná odchylka jasu ($r = 0,63$)



c) Šikmost ($r = - 0,16$)

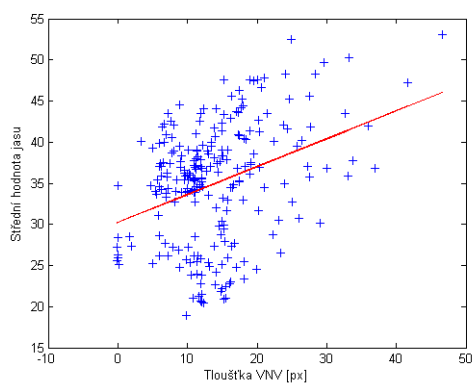


d) Energie ($r = - 0,60$)

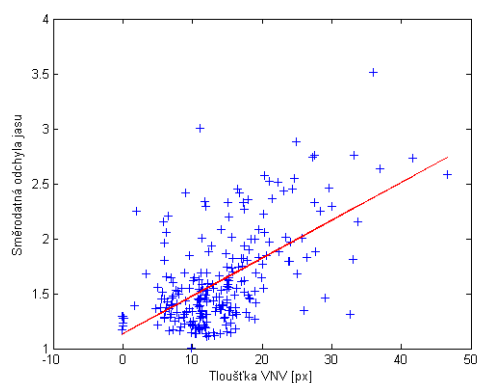


e) Entropie ($r = 0,64$)

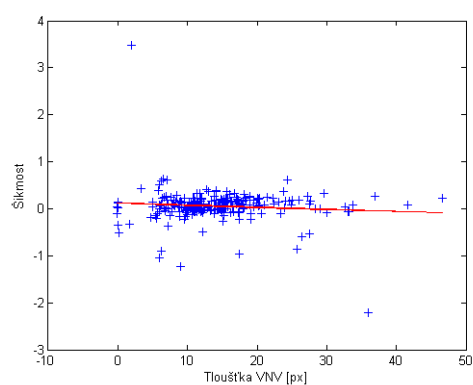
Obr. 4.8: Korelační diagramy tloušťky VNV a texturních příznaků pro zdravé oči



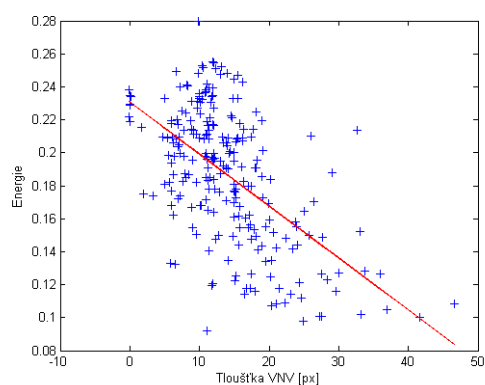
a) Střední hodnota jasu ($r = 0,35$)



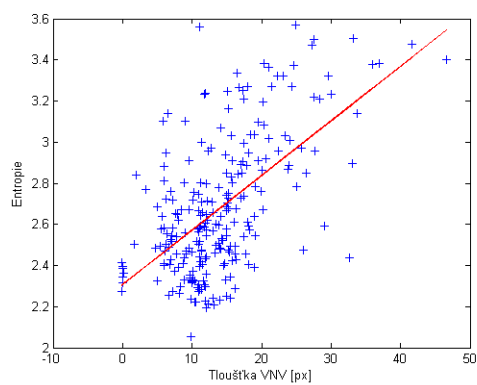
b) Směrodatná odchylka jasu ($r = 0,59$)



c) Šikmost ($r = - 0,09$)



d) Energie ($r = - 0,57$)



e) Entropie ($r = 0,59$)

Obr. 4.9: Korelační diagramy tloušťky VNV a texturních příznaků pro nemocné oči

5 REALIZOVANÉ PROGRAMOVÉ FUNKCE

Metodika analýzy prezentovaná touto prací byla implementována v programovém prostředí MATLAB. Při realizaci metod bylo vytvořeno několik samostatných funkcí. Všechny vytvořené programové moduly jsou komentovány a v následujícím textu stručně charakterizovány.

Funkce pro výběr vzorků textury

K výběru vzorků jsou určeny dva komentované m-fily s názvy *Vyber_vzorku_textury.m* a *Volani_vyberu.m*. První ze jmenovaných m-filů obsahuje přímo funkci pro výběr, druhý realizuje pomocné kroky algoritmu a volání funkce. Zde je nutné zadat cesty načtení obrázku, uložení výběru a požadovanou velikost okna výběru. Po spuštění m-filu se zobrazí obrázek (zprůměrovaný $(G+B/2)$), ve kterém se v prvním kroku pomocí ukazatele myši manuálně určují dva body v pořadí - střed optického disku, střed makuly. Souřadnice vybraných bodů se stávají společně s načteným obrázkem a velikostí okna výběru vstupem volané funkce. Na základě zvolených bodů se přímo do analyzovaného snímku vykreslí maska sektorů dle Obr. 4.4. V ní následuje manuální výběr jednotlivých vzorků textury VNV, soustředěný vždy do jednoho sektoru. Při výběru je v hlavním okně MATLABu veden dialog, kde je před každým výběrem potřebné potvrdit/ukončit výběr z daného sektoru. Po ukončení se vzorky ze sektoru uloží do 3D matice. Pro výběr z dalšího sektoru se celý postup opakuje. Do m-filu *Volani_vyberu.m* je nutné při výběru z dalších sektorů ručně vepsat souřadnice středu optického disku a střed makuly, tak jak byly manuálně určeny pro výběr z prvního sektoru a uloženy do proměnných *S* a *A* (z důvodu vykreslení kružnice do souhlasné polohy podle prvního výběru).

```
function[out,X,Y,okno]=Vyber_vzorku_textury(im,stred_x,stred_y,x1,y1,okno)
```

M-file pro přepoččet bodů z fundus snímku do tloušťkové mapy OCT

M-file s názvem *OCT_fun_selected_data_read.m* dohledává ke vzorkům vybraným z fundus snímku konkrétní informacemi z tloušťkové mapy OCT. Program prochází podadresáře z hlavního adresáře, k němuž je nutné zadat cestu. Z podadresářů jsou načítány vybrané vzorky dle příslušnosti k jednotlivým sektorům v pořadí 1-10 a jsou ukládány do matice *norm_samples*. Matice *sektor_target_n* je souběžně plněna pomocnými proměnnými ukazujícími příslušnost k jednotlivým sektorům tak, jak jsou uloženy v matici *norm_samples*. Dalším výstupem této části programu jsou matice *X_fun* a *Y_fun* s konkrétními *x*, *y* souřadnicemi vzorků v originálním fundus snímku, také v odpovídajícím pořadí jako v matici *norm_samples*.

Druhá část funkce načítá z totožných podadresářů OCT RAW data (soubory s příponou *.vol). Načítají se snímky SLO, pozice jednotlivých B-skenů a tloušťková mapa VNV *thickness_*.mat* (je-li vytvořená).

Následující část funkce slouží pro přepoččet souřadnic vzorků z originálního fundus snímku do OCT. Zde je nutná dostupnost registračních a segmentačních dat získaná dle [17]. Konkrétně jde o soubory *reg_param_vol_*.mat*. Program dále volá funkci *prepocet_bodu5*. Vstupem funkce jsou souřadnice registrovaného snímku, které jsou v rámci funkce přepočítávány do originálního fundus snímku. Tak je vytvořena poziční mapa, z níž dochází ke zpětnému odhadování korespondujících souřadnic v SLO snímku, ty jsou ukládány do matic *X_slo* a *Y_slo*.

```
function[ROWnew,COLnew]=prepocet_bodu5(col,row,M,nc_fl,nr_fl,presah)
```

Poslední část funkce přepočítává souřadnice z SLO snímku do tloušťkové mapy VNV. V cyklu je testována oblast, kterou binární mapa (viz Obr. 4.3d) pokrývá oblast SLO snímku (viz Obr. 4.3). Do matice *vzorky_norm_cell* jsou z původní matice *norm_samples* ukládány pouze vyhovující vzorky, jejichž souřadnice testováním prošly; tedy ty, ke kterým existují korespondující souřadnice v tloušťkové mapě. Obdobně je k selektovaným vzorkům vytvořena nová matice *sektor_target_cell* s příslušností vzorků k sektorům a matice jednotlivých souřadnic *X_slo_cell*, *Y_slo_cell*, *X_fun_cell* a *Y_fun_cell*; všechny s korespondujícím pořadím prvků vůči pořadí vzorků v matici

vzorky_norm_cell. Zároveň je z příslušných souřadnic tloušťkové mapy *slo_thick* generovaná matice *hodnota_tloustky_cell*, ve které jsou opět v korespondujícím pořadí hodnoty tloušťek hledaných vzorků.

Funkce pro výpočet texturních příznaků

Výpočty texturních příznaků dle rovnic (3.2) - (3.6) jsou realizovány jako samostatné funkce, jejichž vstupem je vždy analyzovaná 3D matice vzorků, uložená v datovém poli CELL. Vzorky jsou po jednom procházeny, každý vzorek podléhá výpočtu histogramu příkazem *hist*, následuje výpočet příslušným vzorcem a uložení na korespondující pozici v nově vzniklém CELLu dle výstupu. Funkce se volají v hlavním okně MATLABu se správně nastaveným pracovním adresářem.

```
function [STH]=Stredni_hodnota(vzorky_norm_cell)
```

```
function [ODCH]=Smerodatna_odchylka(vzorky_norm_cell)
```

```
function [SIK]=Sikmost(vzorky_norm_cell)
```

```
function [ENG]=Energie(vzorky_norm_cell)
```

```
function [ENT]=Entropie(vzorky_norm_cell)
```

M-file pro výpočet korelační anlyzy

M-file musí načíst dvě proměnné, které budou korelacím podléhat. Hodnoty z načtených CELLů jsou přeuloženy do vektorů (pro přeuložení je nutné manuálně zadat název proměnných na příslušná místa). Podmínkou je stejný počet prvků na sobě odpovídajících pozicích obou vektorů. Výstupem je vykreslený korelační diagram a vypočítaný korelační koeficient *r*.

6 DISKUSE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Detailní popis textury VNV na fundus snímcích byl proveden v několika krocích. Výstupy těchto kroků jsou v následujícím textu stavěny do souvislostí.

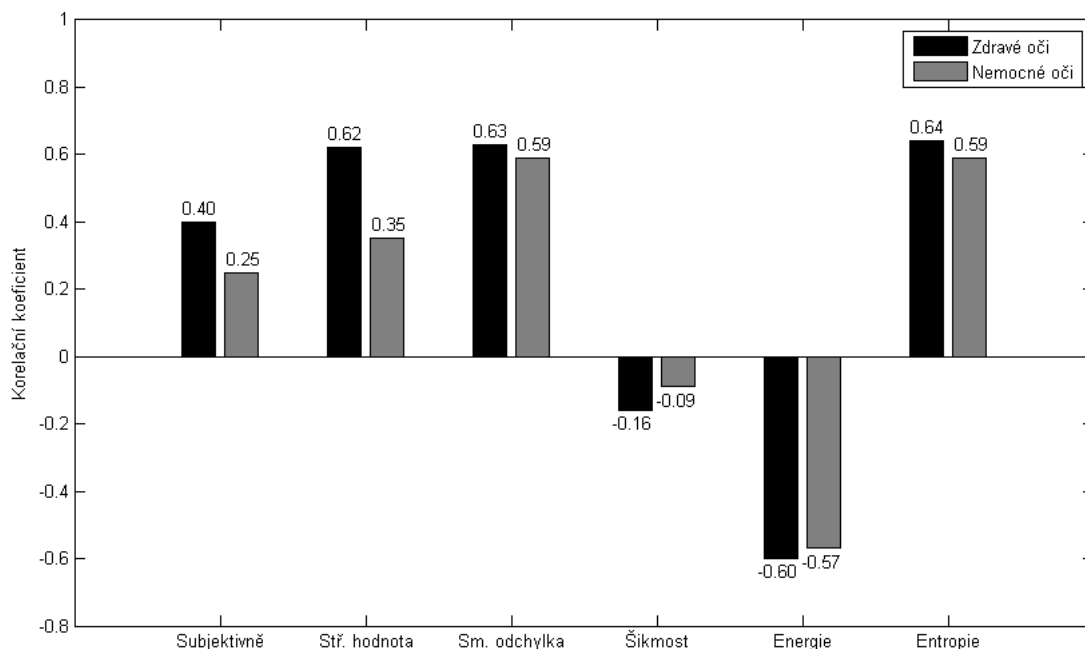
Ze subjektivních hodnocení textury a kvality fundus snímků, pro všechny hodnocené parametry textury VNV (směrovost textury, velikost primitiv, hustota primitiv, pravidelnost), vychází pro zdravá data obou databází jako sektor číslo 2, nejlépe interpretující texturu obrazu. Tento sektor je na snímcích lokalizován do oblasti majoritních zásobovacích cév. Potvrzují se tak teoretické poznatky o struktuře a textuře VNV popsané v kapitole 1 a 2. Přestože je zde očekávaná textura v rámci snímku nejlépe viditelná a primitiva textury v podobě proužků dobře pozorovatelná, parametr pravidelnosti textury je příznivě hodnocen i pro sektor číslo 3. V tomto sektoru nejsou jednotlivé proužky viditelně spojitě, nicméně vlákna jsou zde reprezentována jemným žiháním, které je vysoce pravidelné.

Parametry textury jsou nejhůře hodnoceny v sektoru číslo 9 následovaném sektorem číslo 5. Sektor 9 je lokalizován nasálně od optického disku. V této oblasti je dle teoretických poznatků VNV fyziologicky zúžena. Naopak v sektoru číslo 5, který je umístěn mezi optickým diskem a středem makuly, jsou nervová vlákna zastoupena ve větším počtu. Subjektivně zjištěnou nedostatečnou interpretaci textury VNV v této oblasti lze přičítat rozdílným anatomickým uspořádáním makuly. Zároveň je možné brát v úvahu hodnocené parametry kvality fundus snímků, pro který vychází jako nejméně kvalitní sektory 9 a 10. Hůře hodnocené sektory leží v oblasti, která je nepříznivě ovlivněna nehomogenitou osvětlení při snímání fundus snímku.

K podobným výsledkům v rámci sektorů vedl druhý krok analýzy, počítající texturní příznaky na vybraných vzorcích textury. Korelační koeficient počítaný pro vizuální vjem textury a tři sledované příznaky - střední hodnotu jasu, směrodatnou odchylku a entropii, vychází v rozmezí 0,58 – 0,75 pro snímky zdravých očí, o něco nižších hodnot dosahují koeficienty pro snímky nemocné 0,46 – 0,65. Tyto výsledky hovoří o poměrně silné míře korelace mezi vizuálním vnímáním textury VNV na retinálních snímcích se základními příznaky textury, které lze vypočítat.

Vzhledem k tomu, že hodnocení byla provedena na datech ze dvou různých databází, nabízí se možnost vzájemného srovnání výsledků pro obě databáze. Výsledky pro snímky z databáze ÚBMI dosahují celkově lepších hodnocení než pro snímky databáze Erlangen. Fotografie z databáze Erlangen snímané bez použití modrozeleného filtru tak ani po převedení do šedotónové podoby (průměrem $(G+B)/2$) neinterpretovaly texturu tak dobře jako snímky databáze ÚBMI snímané přes autofluorescenční filtr. Nicméně celkové hodnoty korelačních koeficientů byly touto skutečností ovlivněny pouze minimálně.

Ze subjektivního posouzení kolísání sledovaných parametrů kolem optického disku byl potvrzen předpoklad, že jednotlivé parametry sledují tloušťku VNV, která se kolem optického disku také charakteristiky mění z fyziologických důvodů. Do korelační analýzy právě mezi tloušťkou VNV a získanými výstupy texturní analýzy byl soubor kvantitativních příznaků doplněn o šikmost a energii. Sloupcový graf na Obr. 6.1 přehledně interpretuje míru korelace objektivně změřené tloušťky VNV s jednotlivými příznaky textury pro skupinu zdravých i nemocných očí.



Obr. 6.1: Sloupcový graf korelačních koeficientů tloušťky VNV s jednotlivými příznaky

Kromě šikmosti je možné parametry považovat za dobře korelující s tloušťkou VNV. U nemocné tkáně je vidět pokles míry korelace oproti tkáni zdravé. Nejpatrnější pokles nastal pro subjektivní hodnocení textury a pro kvantitativní parametr střední hodnoty jasu. Právě střední hodnota jasu dosahovala z texturních příznaků nejvyšší míry korelace s vizuálně vnímaným charakterem textury, především u tkáně nemocné. Střední hodnota jasu tedy ze sledovaných příznaků nejlépe sleduje subjektivní hodnocení textury. Tloušťka VNV je v nejužší míře spojena s entropií a směrodatnou odchylkou, které jsou následovány energií.

U multimodální analýzy je nutné brát v úvahu zúženou základnu analyzovaných dat, především u snímků nemocných očí; z původních 14 snímků nemocných očí databáze Erlangen bylo do multimodální analýzy možné zařadit pouze 4 fotografie. U subjektivního hodnocení musely být uvažovány zprůměrované výstupy v rámci sektorů, což může způsobovat negativní dopad na výsledky výpočtu korelačního koeficientu. U snímků nemocných očí je také nutné brát v úvahu skutečnost, že glaukomové poškození často postihuje věkově starší populaci, u které se současně objevuje zakalená čočka, která znesnadňuje snímání očního pozadí v odpovídající kvalitě. Analyzované snímky byly místy rozostřené, což pravděpodobně negativně ovlivňuje výstupy analýz.

Na základě popsaných výsledků je možné konstatovat, že vybrané základní texturní příznaky statistiky prvního řádu poměrně dobře vystihují popis vizuálně vnímané textury VNV na fundus snímcích a zároveň i informaci o tloušťce VNV. Zároveň musí být bráno v potaz, že subjektivní hodnocení parametrů bylo provedeno jednou osobou a k cílenému ověřování, by tak mělo být učiněno větším počtem osob. Multimodální analýza probíhala na datech z jedné databáze a to na omezeném počtu snímků (zvláště ve skupině nemocných očí). Rozšíření základny testovaných dat by přispělo k rozsáhlejšímu ověření stanovených cílů.

ZÁVĚR

Předmětem zájmu této bakalářské práce byla analýza oftalmologických dat z pohledu diagnostiky glaukomu. Samotná diagnostika tohoto onemocnění se běžně v klinické praxi opírá o subjektivní hodnocení charakteru textury VNV na snímcích sítnice, pořízených fundus kamerou, zkušenými oftalmology. Dosud však neexistuje plně automatická a komplexní metoda texturní analýzy, která by byla schopna texturu VNV na fundus snímcích kvantitativně a objektivně charakterizovat. Z těchto důvodů byla tato práce zaměřena na vytvoření metodiky s cílem účelně popsat charakteristické vlastnosti této textury jak z kvalitativního, tak z kvantitativního hlediska. Tato metodika by tak mohla být východiskem pro budoucí vývoj vyšších metod zpracování fundus snímků za účelem podpory diagnostiky glaukomu.

Nejdříve byla textura VNV hodnocena subjektivně a ke kvantitativnímu popisu textury VNV bylo využito základních metod texturní analýzy využívajících jako příznaky statistiky prvního řádu. Dále byla analyzována míra korelace mezi kvantitativními výstupy z texturní analýzy a vizuálním vjemem, který fundus snímek z digitální fundus kamery o přítomnosti textury VNV poskytuje. Multimodální korelační analýza, zahrnující informace o skutečné tloušťce VNV extrahované z OCT dat, následně umožnila objektivně ověřit, zda jsou výsledky z kvalitativní i kvantitativní analýzy textury VNV spolehlivé. Vypočtené hodnoty korelačních koeficientů stvrzují definované předpoklady a závislosti vycházející z předpokládaných anatomických a fyziologických vlastností VNV.

Vzhledem k použitému základnímu přístupu aplikovaných metod texturní analýzy se jeví jako žádoucí pro bližší a ucelenější popis textury VNV využít pro budoucí analýzu VNV, kromě statistik prvního řádu, i sofistikovanějších metod texturní analýzy. Při vývoji těchto metod je možné cíleně navázat na základní zjištěné poznatky z této práce. V budoucí práci by se mělo docílit takového vývoje metod texturní analýzy, které by s využitím získaných poznatků byly schopny rozlišit mezi zdravou tkání a tkání změněnou v důsledku glaukomového onemocnění. Zde je možné zmínit např. pokročilejší metody texturní analýzy [22], [25], které jsou již ve vývoji na ÚBMI FEKT VUT v Brně. První z těchto metod je založena na popisu

textury použitím lokálních binárních vzorů (LBP – Local Binary Patterns) a druhá metoda texturu modeluje pomocí Markovových náhodných polí (MRF – Markov Radom Fields). Předpokládá se, že získané poznatky a dosažené výsledky z této bakalářské práce umožní další rozvoj vyšších metod texturní analýzy pro účely spolehlivé klasifikace tloušťky VNV s využitím pouze fundus snímků sítnice bez nutnosti použití dodatečného OCT měření, které je časově i finančně náročné a představuje tak zátěž jak pro pacienta, tak pro obsluhující personál.

LITERATURA

- [1] AIRAKSINEN, J. P.; DRANCE, S.M. at al. Diffuse and localized nerve fiber loss in glaucoma, *American Journal of Ophthalmology*. 1984, vol. 98, no. 5, p. 566-71.
- [2] AIRAKSINEN, J. P.; DORO, S.; VEIJOLA, J. Conformal geometry of the retinal nerve fiber layer, *PNAS*. 2008, vol.105, no. 50, p. 19690-5.
- [3] BEVK, M.; KONONENKO, I. A statistical approach to texture description of medical images: A preliminary study. *The nineteenth international conference on machine learning '02*. 2002, [cit. 14. května 2011], dostupné na [www: <http://www.cse.unsw.edu.au/~icml2002/workshops/MLCV02/MLCV02-Bevk.pdf>](http://www.cse.unsw.edu.au/~icml2002/workshops/MLCV02/MLCV02-Bevk.pdf).
- [4] BOCK, R. et al. Glaucoma risk index: Automated glaucoma detection from color fundus images, *Medical Image Analysis*. 2010, doi:10.1016/j.media.2009.12.006.
- [5] CIULLA, T.A.; REGILLO C.D.; HARRIS A.H. *Retina and optic nerve imaging*. Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia, 2003, p.369. ISBN 0-7817-3433-9.
- [6] DIRGE, K. B. *Using the ophthalmoscope and viewing the optic disc*. University of Utah, 2002. [cit. 30. prosince 2010], dostupné na [www: <http://umed.med.utah.edu/neuronet/lectures/2002/Optic%20Disk.htm>](http://umed.med.utah.edu/neuronet/lectures/2002/Optic%20Disk.htm).
- [7] FLAMMER, J. *Glaukom, průvodce pro pacienty, úvod pro zdravotníky*. Trilon, 1. vydání 2003. ISBN 80-7254-351-2.
- [8] FROSZ, M. H.; JUHL, M.; LANG, M.H. *Optical coherence tomography: System design and noise analysis*. A report of Risø National Laboratory, 2001. Risø-R-1278(EN). [cit. 14. května 2011], dostupné na [www: <http://130.226.56.153/rispubl/ofd/ofdpdf/ris-r-1278.pdf>](http://130.226.56.153/rispubl/ofd/ofdpdf/ris-r-1278.pdf).
- [9] HARALICK, R. M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEN I. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*. November 1973, vol. SMC-3, no. 6, pp.610-21.
- [10] HAWANG, J. at al. Correlation between topographic profiles of localized retinal nerve fiber layer defect as determined by optical coherence tomography and red-free fundus photograph, *Journal of Glaucoma*. 2006, vol. 15, no. 3, p. 223-8.
- [11] HRAZDÍRA, I.; MORNSTEIN, V. *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. Neptun, 1. vydání 2004. ISBN 80-902896-1-4.
- [12] *Informace prezentované Dr. Arkadiyem Davydovem*. 2010, [cit. 30. prosince 2010], dostupné na [www: <http://www.forbestvision.com>](http://www.forbestvision.com).
- [13] *Informace výrobce Heidelberg Engineering*. 2011, [cit. 14. května 2011], dostupné na [www: <http://www.heidelbergengineering.com>](http://www.heidelbergengineering.com).
- [14] *Informace z oční ordinace MUDr. Tomáše Kuběny*. 2011, [cit. 14. května 2011], dostupné na [www: <http://www.kubena.cz>](http://www.kubena.cz).

- [15] JANSONIUS, N. M. at al. A mathematical description of nerve fiber bundle trajectories and their variability in the human retina. *Vision Research*. 2009, vol.49, no. 17, p. 2157-63.
- [16] KOLÁŘ, R.; OSTRČILÍK, J.; JAN, J. Illumination correction and contrast equalization in colour fundus images. In *Proc. Of 19th European Signal Processing Conference, EUSIPCO 2011*. 29. srpna – 2. září, Barcelona (přijato k publikaci).
- [17] KOLÁŘ, R.; TORRNOW, R. P.; LAEMMER, R., at al. Texture analysis in fundus images to assess the retinal nerve fiber layer – study on normal subjects. *Biomedical Optical Express*, 2011. (submitted).
- [18] KOLÁŘ, R., *Methods for image analysis and pattern recognition – Application to early glaucoma diagnosis*. Habilitační práce. ÚBMI, FEKT, VUT v Brně, 2008.
- [19] MELOUN, M.; MILITKÝ, J. *Statistické zpracování experimentálních dat*. ACADEMIA Praha, rozšířené vydání 2004, 980 s. ISBN 80-200-1254-0.
- [20] MURAMATSU, CH.; HAYASHI, Y.; SAWADA, A. at al. Detection of retinal nerve fiber layer defects on retinal fundus images for early diagnosis of glaucoma, *Journal of Biomedical Optics*. February 2010, vol. 15, no. 1, pp. 1-7.
- [21] NEVALAINEN, J. *Utilisation of the structure of the retinal nerve fiber layer and test strategy in visual field examination*. Academic dissertation. Faculty of Medicine, Institute of clinical medicine, Department of Ophthalmology, University of Oulu, Finland 2010. ISBN 978-951-42-6201-2.
- [22] NOVOTNÝ, A.; OSTRČILÍK J.; KOLÁŘ, R. at al. Texture analysis of nerve fibre layer in retinal images via local binary patterns and Gaussian Markov random fields. In *20th Biennial International EURASIP Conference BIOSIGNAL 2010. Analysis of Biomedical Signals and Images*. Brno: EURASIP, 2010. pp. 308-15.
- [23] OSTRČILÍK, J. *Analýza barevných snímků sítnice se zaměřením na segmentaci cévního řečiště: diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 82 s., 2 přílohy. Vedoucí diplomové práce je prof. Ing. Jiří Jan, CSc.
- [24] OSTRČILÍK, J. *Analýza obrazových dat sítnice pro podporu lékařské diagnostiky: pojednání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. Vedoucí práce doc. Ing. Radim Kolář, Ph.D.
- [25] OSTRČILÍK, J.; KOLÁŘ, R.; HARABIŠ, V. at al. Retinal nerve fiber layer analysis via Markov random fields texture modelling. *European Signal processing Conference EUSIPCO 2010*. EURASIP, p. 1650-4.
- [26] PELI, E.; HEDGES, T. R.; SCHWARTZ, B. Computer measurement of retinal nerve fiber layer, *Applied optics*. 1989, vol. 28, no. 6, p. 1128-34.
- [27] REMO, S. *Optics disc assessment /RNFL overview*. SEAGING-IMAGE module, 2004, [cit. 14. května 2011], dostupné na [www: <http://www.seagig.org/toc/OptDiscRNFL\(NM\).pdf>](http://www.seagig.org/toc/OptDiscRNFL(NM).pdf).
- [28] ŘEHÁK, S. at al. *Oční lékařství, učebnice pro lékařské fakulty*. Avicenum, 2. vydání 1989. ISBN 08-033-89.

- [29] VEČEREC, V.; BEDÁŇOVÁ, I. *Základy statistiky pro studující veterinární medicíny a farmacie*. Brno: FVU, 1.vydání 2007, 129 s. ISBN 978-80-7305-026-9.
- [30] VÝBORNÝ, P.; DOHNALOVÁ, P. OCT – Optical coherence tomography. In *Zobrazovací techniky v diagnostice glaukomu*. Brno: Medica Publishing and Consunting, 2004. pp. 18-22.
- [31] *Zdroj obrázku* – CROOK, J. *Why is the retina back-to-front?* 2003, [cit. 30. prosince 2010], dostupné na [www: <http://www.catalase.com/retina.htm>](http://www.catalase.com/retina.htm).
- [32] *Zdroj obrázku*. 2010, [cit. 30. prosince 2010], dostupné na [www: <http://www.lpoproducts.com/Products/LPO13.asp>](http://www.lpoproducts.com/Products/LPO13.asp).
- [33] *Zdroj obrázku*. 2011, [cit. 14. května 2011], dostupné na [www: <http://www.oftis-opta.cz/img/k27i04b.jpg>](http://www.oftis-opta.cz/img/k27i04b.jpg).
- [34] *Zdroj obrázku* – Dallal, G. E. *Correlation Coefficients*. 2008, [cit. 14. května 2011], dostupné na [www: <http://www.jerrydallal.com/LHSP/corr.htm>](http://www.jerrydallal.com/LHSP/corr.htm).

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

CCD	Charged Couple Device
Eng	Energie
Ent	Entropie
FEKT	Fakulata elektrotechniky a komunikačních technologií
FOV	Field of View
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LBP	Local Binary Patterns
MRF	Markov Random Fields
OCT	Optical Coherence Tomography
r	Pearsonův korelační koeficient
RGB	Red - Green – Blue (Channel)
S	Šikmost
SLO	Scanning Laser Ophthalmoscopy
ÚBMI	Ústav biomedicínského inženýrství
VNV	Vrstva nervových vláken
VUT	Vysoké učení technické
μ	Střední hodnota jasu
σ	Směrodatná odchylka jasu

SEZNAM PŘÍLOH

A Subjektivní hodnocení obrazových dat – zdravé oči ÚBMI	54
A.1 Směrovost textury.....	54
A.2 Velikost primitiv.....	55
A.3 Hustota primitiv.....	55
A.4 Pravidelnost.....	56
A.5 Ostrost obrazu.....	56
A.6 Úroveň jasu.....	57
A.7 Šumová složka.....	57
B Subjektivní hodnocení obrazových dat – zdravé oči Erlangen	58
B.1 Směrovost textury.....	58
B.2 Velikost primitiv.....	59
B.3 Hustota primitiv.....	60
B.4 Pravidelnost.....	61
B.5 Ostrost obrazu.....	62
B.6 Úroveň jasu.....	63
B.7 Šumová složka.....	64
C Subjektivní hodnocení obrazových dat - nemocné oči	65
C.1 Úroveň jasu – data ÚBMI.....	65
C.2 Úroveň jasu – data Erlangen.....	66

A SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ OBRAZOVÝCH DAT – ZDRAVÉ OČI ÚBMI

A.1 Směrnost textury

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
L1	2	4	2	1	1	2	3	2	1	1
L2	2	4	2	2	1	2	3	1	1	1
L3	3	4	3	2	1	3	3	2	1	2
L4	3	4	2	1	1	2	3	1	1	1
L5	2	4	1	1	1	1	2	1	1	2
L6	4	5	3	2	1	3	4	2	1	2
L7	3	4	2	1	1	3	2	1	1	1
L8	3	4	2	2	1	2	3	2	1	1
L9	4	3	2	1	1	1	3	2	1	4
R1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2
R2	1	3	3	1	1	3	3	1	1	1
R3	2	5	3	1	1	3	4	1	1	1
R4	3	5	2	1	1	1	4	1	1	2
R5	3	3	1	1	1	1	1	1	1	2
R6	3	5	4	2	2	4	5	3	1	2
R7	4	4	2	1	1	3	3	1	1	2
R8	5	4	4	1	1	2	4	1	1	1
R9	3	5	3	2	1	2	1	1	1	2
průměr	2,83	4,00	2,33	1,33	1,06	2,17	2,94	1,39	1,00	1,67

A.2 Velikost primitiv

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
L1	3	4	2	1	1	2	3	1	1	2
L2	1	5	2	1	1	2	4	1	1	1
L3	4	5	3	2	1	3	3	1	1	3
L4	4	5	2	1	1	3	4	1	1	1
L5	3	5	1	1	1	1	1	2	1	1
L6	4	5	3	2	2	3	5	4	1	3
L7	4	5	2	1	1	3	2	1	1	1
L8	3	3	2	1	1	3	2	1	1	1
L9	4	4	3	1	1	3	3	1	1	3
R1	1	3	2	1	1	2	3	1	1	1
R2	1	3	2	1	1	2	3	1	1	1
R3	3	5	2	1	1	4	4	1	1	2
R4	3	5	2	1	1	1	3	1	1	1
R5	3	4	1	1	1	2	2	1	1	2
R6	3	5	3	3	3	3	5	3	1	2
R7	4	5	3	1	1	5	2	1	1	2
R8	4	5	3	1	1	3	3	3	1	1
R9	3	5	2	1	1	3	3	1	1	3
průměr	3,06	4,50	2,22	1,22	1,17	2,67	3,06	1,44	1,00	1,72

A.3 Hustota primitiv

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
L1	3	2	4	5	5	4	3	5	5	5
L2	5	2	4	5	5	4	2	5	5	5
L3	1	2	3	4	5	4	3	5	5	4
L4	1	1	4	5	5	3	2	5	5	5
L5	2	1	5	5	5	5	4	5	5	5
L6	2	1	3	4	4	3	1	5	5	2
L7	1	1	4	5	5	3	4	5	5	4
L8	3	3	4	5	5	4	4	5	5	5
L9	3	2	4	5	5	5	3	5	5	4
R1	4	3	4	5	5	4	3	5	5	5
R2	5	3	4	5	5	4	4	5	5	5
R3	3	2	4	5	5	3	2	5	5	2
R4	2	1	4	5	5	5	2	5	5	5
R5	2	1	4	5	5	5	4	5	5	4
R6	2	1	3	4	4	3	1	3	5	3
R7	3	2	4	5	5	2	4	5	5	3
R8	5	2	4	5	5	3	4	4	5	5
R9	5	4	1	3	5	5	3	4	5	5
průměr	2,89	1,89	3,72	4,72	4,89	3,83	2,94	4,78	5,00	4,22

A.4 Pravidelnost

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
L1	2	5	4	1	1	3	3	1	1	1
L2	1	3	4	2	1	3	1	1	1	1
L3	2	4	4	3	1	3	4	2	1	3
L4	2	3	4	2	1	4	4	1	1	1
L5	3	4	2	1	1	1	2	1	1	1
L6	4	3	5	2	1	4	3	2	1	2
L7	4	5	5	1	1	3	3	1	2	2
L8	3	3	3	2	2	4	4	2	1	1
L9	5	4	5	2	1	2	3	2	1	3
R1	2	4	2	2	1	2	4	1	1	2
R2	2	3	4	1	1	3	3	1	1	1
R3	3	5	2	1	1	2	4	1	1	1
R4	5	4	3	1	1	2	3	2	1	1
R5	4	3	2	1	1	2	1	1	1	1
R6	2	4	4	1	1	4	3	2	1	1
R7	4	3	4	1	1	2	1	1	1	1
R8	3	4	3	2	1	2	4	2	1	1
R9	4	4	5	4	2	3	2	2	1	2
průměr	3,06	3,78	3,61	1,67	1,11	2,72	2,89	1,44	1,06	1,44

A.5 Ostrost obrazu

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10	průměr
L1	3	2	2	1	1	3	3	3	2	2	2,2
L2	2	3	2	1	1	2	2	1	1	1	1,6
L3	2	2	1	1	1	2	2	1	1	2	1,5
L4	2	3	3	1	1	2	2	3	3	3	2,3
L5	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1,5
L6	3	2	2	1	2	2	2	3	2	3	2,2
L7	2	3	3	3	2	2	3	3	3	2	2,6
L8	3	2	2	2	2	3	3	3	2	3	2,5
L9	3	3	2	1	1	2	2	2	3	3	2,2
R1	3	3	2	1	1	2	1	2	2	2	1,9
R2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	3	2,7
R3	3	3	2	2	1	1	3	3	2	3	2,3
R4	3	3	2	1	1	2	3	2	2	2	2,1
R5	3	3	2	1	1	2	2	2	2	2	2,0
R6	3	2	2	1	1	2	2	2	3	3	2,1
R7	2	3	2	3	1	2	2	2	2	2	2,1
R8	2	2	2	2	2	3	3	2	2	1	2,1
R9	2	2	2	1	2	2	2	2	3	3	2,1
průměr	2,56	2,56	2,11	1,50	1,39	2,11	2,22	2,17	2,17	2,33	

A.6 Úroveň jasu

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10	průměr
L1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1,8
L2	1	2	2	2	2	2	3	2	1	1	1,8
L3	2	3	2	2	2	3	3	2	1	1	2,1
L4	1	3	2	2	2	2	3	2	1	1	1,9
L5	2	3	2	2	2	3	3	2	1	1	2,1
L6	2	3	2	2	2	2	3	2	1	1	2,0
L7	2	3	2	2	2	3	3	2	1	2	2,2
L8	2	3	2	2	2	3	2	2	1	1	2,0
L9	2	3	2	2	2	2	3	3	1	1	2,1
R1	2	3	2	2	2	2	3	2	1	1	2,0
R2	2	3	2	2	2	2	2	1	2	2	2,0
R3	2	3	2	1	1	3	3	2	1	1	1,9
R4	2	2	2	2	2	2	3	2	1	1	1,9
R5	2	3	2	2	2	3	3	2	1	1	2,1
R6	2	3	2	2	2	2	3	2	1	1	2,0
R7	2	3	2	2	2	3	3	2	1	1	2,1
R8	2	3	2	2	2	3	2	2	1	1	2,0
R9	2	3	2	1	2	2	3	3	1	2	2,1
průměr	1,89	2,83	2,00	1,89	1,94	2,44	2,78	2,06	1,06	1,17	

A.7 Šumová složka

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10	průměr
L1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2,9
L2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2,8
L3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	2	2,7
L4	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2,4
L5	3	2	2	1	1	2	2	3	2	2	2,0
L6	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2,8
L7	2	2	2	1	1	3	2	3	3	3	2,2
L8	3	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2,7
L9	2	1	2	1	1	1	1	2	3	3	1,7
R1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2,9
R2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2,9
R3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2	2,8
R4	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2,9
R5	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2,9
R6	3	3	3	2	2	3	3	3	3	2	2,7
R7	3	3	2	1	1	3	3	3	3	3	2,5
R8	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2,9
R9	2	3	3	2	1	2	2	2	2	2	2,1
průměr	2,61	2,72	2,78	2,33	2,33	2,72	2,67	2,72	2,72	2,39	

B SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ OBRAZOVÝCH DAT – ZDRAVÉ OČI ERLANGEN

B.1 Směrovost textury

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
L1	4	3	1	1	1	2	4	1	1	2
L2	3	4	4	2	2	5	4	3	1	2
L3	5	4	4	2	2	5	3	3	1	2
L4	4	3	2	1	1	3	4	3	1	2
L5	2	4	3	1	1	3	4	2	1	1
L6	3	5	3	2	2	5	4	3	2	3
L8	3	4	5	2	2	3	2	1	1	2
L9	2	4	5	1	1	3	1	1	1	3
L10	3	3	3	2	1	4	4	3	1	2
L11	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
L12	5	4	3	1	1	2	5	3	2	3
L13	1	2	1	2	2	3	1	1	1	1
L14	5	4	5	2	2	3	3	2	2	4
L15	4	5	5	1	1	5	4	3	1	2
L16	4	5	3	1	1	2	4	2	1	3
L18	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1
R2	3	2	3	1	1	2	2	1	1	2
R3	2	3	5	1	1	3	2	1	1	2
R4	2	4	5	2	1	3	3	2	1	1
R5	2	4	2	1	1	2	2	1	1	1
R6	2	4	5	1	1	4	3	2	2	2
R7	2	4	4	1	1	1	3	1	1	1
R9	1	1	1	3	2	2	1	1	1	1
R10	4	5	4	1	1	3	2	1	1	2
R12	4	3	5	2	2	4	3	2	2	2
R13	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2
R14	3	4	4	2	1	2	3	3	2	2
R15	3	5	2	1	1	2	1	2	1	2
R16	3	4	3	2	2	1	3	2	1	1
R17	2	4	2	1	1	3	2	2	1	1
R18	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
průměr	2,77	3,48	3,13	1,42	1,29	2,74	2,65	1,81	1,19	1,84

B.2 Velikost primitiv

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
L1	4	5	2	1	1	3	4	1	1	3
L2	3	4	2	2	2	3	4	3	1	3
L3	4	5	3	2	1	4	5	3	1	2
L4	3	5	2	1	1	3	4	3	1	2
L5	3	5	2	1	1	2	3	1	1	1
L6	4	5	3	2	2	3	3	3	3	4
L8	4	5	3	2	2	2	1	1	1	1
L9	3	5	2	1	1	2	1	1	1	3
L10	3	3	2	2	1	3	3	2	1	1
L11	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1
L12	4	5	3	1	1	2	4	3	3	3
L13	1	5	2	2	2	2	1	1	1	1
L14	3	5	2	2	2	2	4	3	2	4
L15	3	5	2	1	1	3	4	2	1	2
L16	3	4	2	1	1	2	4	1	1	3
L18	1	3	1	1	1	2	2	1	1	1
R2	2	2	2	1	1	1	1	3	1	3
R3	1	4	2	1	1	2	3	1	1	1
R4	3	5	3	2	1	4	3	1	1	1
R5	2	5	2	1	1	1	1	1	1	1
R6	2	4	3	1	1	2	3	2	2	3
R7	3	3	2	1	1	1	2	1	1	2
R9	1	1	3	1	1	2	1	1	1	1
R10	2	3	2	1	1	3	2	1	1	1
R12	4	5	3	2	2	3	4	2	1	3
R13	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1
R14	3	5	3	2	1	2	3	1	2	2
R15	4	5	3	1	1	4	1	2	1	3
R16	2	4	2	2	2	1	2	1	1	1
R17	2	3	2	1	1	2	2	2	1	1
R18	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1
průměr	2,58	4,13	2,26	1,35	1,23	2,23	2,52	1,65	1,23	1,94

B.3 Hustota primitiv

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
L1	3	1	4	5	5	3	2	5	5	3
L2	3	1	3	4	4	3	2	3	5	3
L3	2	1	3	4	5	1	2	4	5	4
L4	2	1	4	5	5	3	2	3	5	3
L5	4	1	3	5	5	3	3	5	5	4
L6	2	1	3	4	4	3	3	3	4	3
L8	3	1	4	5	5	4	5	5	5	3
L9	3	1	4	5	5	3	5	5	5	3
L10	3	3	4	4	5	3	3	4	5	5
L11	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5
L12	2	1	3	5	5	4	2	2	3	3
L13	5	1	4	4	4	3	5	5	5	5
L14	3	1	3	4	4	3	2	3	4	3
L15	3	2	4	5	5	4	3	4	5	3
L16	2	1	3	5	5	4	2	5	5	3
L18	5	2	5	5	5	4	3	5	5	5
R2	3	3	3	5	5	4	2	4	5	4
R3	5	2	3	5	5	4	3	5	5	5
R4	2	1	4	4	5	3	3	5	5	5
R5	4	1	5	5	5	5	3	5	5	5
R6	4	1	3	5	5	4	3	2	2	3
R7	3	3	4	5	5	5	4	5	5	4
R9	5	5	4	5	5	4	5	5	5	5
R10	4	3	3	5	5	3	4	5	5	5
R12	2	1	3	4	4	3	2	5	3	2
R13	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5
R14	4	2	3	4	5	4	4	5	5	3
R15	2	1	4	5	5	3	1	4	1	3
R16	4	2	4	4	4	5	4	5	5	5
R17	4	3	4	5	5	4	4	4	5	5
R18	5	1	5	5	5	5	5	5	5	5
průměr	3,42	1,74	3,71	4,68	4,81	3,68	3,26	4,35	4,58	3,94

B.4 Pravidelnost

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10
L1	4	3	5	1	1	3	5	1	1	4
L2	3	5	4	2	2	4	5	3	1	2
L3	3	3	5	4	1	4	3	2	1	2
L4	5	3	5	1	1	3	3	4	1	2
L5	5	2	3	1	1	4	3	2	1	2
L6	5	5	5	2	2	5	4	4	3	5
L8	3	3	5	2	2	4	1	1	1	2
L9	2	3	5	1	1	2	1	1	1	3
L10	3	4	5	3	1	4	4	4	1	3
L11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
L12	5	4	4	1	1	3	5	3	2	3
L13	1	2	3	3	3	4	1	1	1	2
L14	5	3	4	3	3	3	4	3	2	4
L15	3	4	5	1	1	5	4	3	1	2
L16	4	4	3	1	1	3	4	2	2	3
L18	1	3	1	1	1	2	3	1	1	1
R2	4	2	3	1	1	4	3	4	1	2
R3	1	2	4	1	1	3	3	2	1	2
R4	2	3	5	1	1	3	2	1	1	1
R5	3	4	3	1	1	1	1	1	1	1
R6	2	2	5	1	1	4	4	2	3	3
R7	3	3	3	1	1	1	3	1	1	2
R9	1	1	4	1	1	4	1	1	1	1
R10	5	4	5	1	1	3	2	1	1	1
R12	4	2	5	4	4	5	2	1	2	3
R13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
R14	4	3	5	4	1	3	4	4	1	2
R15	4	3	4	1	1	3	1	3	1	2
R16	4	3	4	5	5	1	4	1	1	1
R17	4	4	4	1	1	4	2	4	1	1
R18	1	5	1	1	1	1	1	1	1	1
průměr	3,10	3,03	3,84	1,71	1,45	3,06	2,74	2,06	1,26	2,10

B.5 Ostrost obrazu

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10	průměr
L1	2	2	3	1	2	2	2	2	2	2	2,0
L2	3	3	2	2	3	2	2	2	1	1	2,1
L3	2	3	3	3	2	2	1	2	1	2	2,1
L4	3	3	3	2	2	1	2	3	1	3	2,3
L5	2	2	1	1	1	2	3	2	2	2	1,8
L6	3	3	3	2	2	2	2	3	3	3	2,6
L8	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1,8
L9	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1,9
L10	3	3	3	3	3	2	2	3	2	2	2,6
L11	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	1,5
L12	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2,2
L13	2	3	3	3	3	3	2	2	1	1	2,3
L14	3	3	2	2	2	2	3	3	3	3	2,6
L15	3	2	2	1	1	2	3	3	2	3	2,2
L16	2	2	3	2	2	2	2	1	1	2	1,9
L18	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1,7
R2	3	2	2	1	1	1	2	2	2	3	1,9
R3	2	2	3	2	3	2	3	2	1	2	2,2
R4	3	3	3	2	2	2	2	3	2	3	2,5
R5	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1,3
R6	2	3	2	3	2	2	3	3	3	3	2,6
R7	2	3	2	2	2	2	2	3	2	2	2,2
R9	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	1,8
R10	3	3	3	1	1	2	2	3	2	2	2,2
R12	3	3	2	2	2	2	1	2	2	2	2,1
R13	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	1,6
R14	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	1,9
R15	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1,2
R16	2	2	3	2	3	3	2	3	1	2	2,3
R17	3	3	3	2	2	2	2	3	2	2	2,4
R18	2	3	3	3	3	3	2	2	1	1	2,3
průměr	2,26	2,42	2,35	1,94	2,00	1,94	1,94	2,16	1,68	2,00	

B.6 Úroveň jasu

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10	průměr
L1	1	3	2	1	2	3	3	2	1	1	1,9
L2	1	3	2	1	1	2	3	2	1	1	1,7
L3	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1,5
L4	1	3	2	1	2	2	3	1	1	1	1,7
L5	1	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1,7
L6	1	3	2	2	2	3	3	1	1	1	1,9
L8	1	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,8
L9	1	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,8
L10	1	3	2	2	2	3	2	1	1	1	1,8
L11	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1,6
L12	1	3	2	2	2	3	3	1	1	1	1,9
L13	2	3	2	2	2	3	1	1	1	1	1,8
L14	1	3	2	2	2	3	2	1	1	1	1,8
L15	1	3	2	1	1	2	1	1	1	1	1,4
L16	2	3	3	2	2	2	3	1	1	1	2,0
L18	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1,6
R2	1	3	2	1	1	2	3	1	1	1	1,6
R3	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1,5
R4	1	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1,7
R5	2	3	2	2	2	3	2	1	1	1	1,9
R6	1	3	2	1	1	2	2	1	1	1	1,5
R7	2	3	2	2	2	3	2	1	1	1	1,9
R9	2	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,9
R10	1	3	2	2	2	3	2	1	1	1	1,8
R12	1	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,8
R13	1	2	2	2	2	3	2	1	1	1	1,7
R14	1	3	2	2	1	3	2	1	1	1	1,7
R15	1	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,8
R16	2	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,9
R17	2	3	2	2	2	3	3	1	1	1	2,0
R18	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1,4
průměr	1,23	2,77	2,03	1,77	1,81	2,39	2,32	1,10	1,00	1,00	

B.7 Šumová složka

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10	průměr
L1	3	3	3	2	3	3	3	3	2	2	2,7
L2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	2	2,3
L3	3	2	3	2	3	3	2	2	3	2	2,5
L4	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	2,7
L5	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2,6
L6	2	2	2	2	2	2	1	2	3	3	2,1
L8	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2,6
L9	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1,9
L10	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	2,8
L11	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1,6
L12	2	3	3	2	2	2	3	3	2	2	2,4
L13	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	1,6
L14	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1,9
L15	2	3	2	1	1	2	2	1	1	1	1,6
L16	3	3	3	2	3	3	3	2	2	2	2,6
L18	1	3	3	2	2	3	3	1	1	1	2,0
R2	3	2	3	2	1	2	1	3	3	3	2,3
R3	2	3	3	2	2	2	2	2	3	2	2,3
R4	3	3	3	3	3	2	3	3	2	2	2,7
R5	2	3	3	2	2	3	3	3	2	2	2,5
R6	2	1	2	1	1	2	1	2	2	2	1,6
R7	2	2	3	1	1	2	2	2	2	2	1,9
R9	3	3	2	3	3	3	2	3	2	2	2,6
R10	3	3	2	2	3	3	2	3	2	2	2,5
R12	3	3	3	2	2	2	3	2	2	2	2,4
R13	2	2	1	2	2	1	1	2	2	2	1,7
R14	2	3	3	2	1	2	2	2	2	2	2,1
R15	2	3	2	1	1	3	3	3	1	1	2,0
R16	3	3	3	2	3	3	3	2	2	2	2,6
R17	3	3	3	2	2	2	3	3	2	2	2,5
R18	3	2	2	3	1	2	2	3	1	3	2,2
průměr	2,39	2,52	2,42	2,03	2,10	2,32	2,29	2,35	2,06	2,03	

C SUBJEKTIVNÍ HODNOCENÍ OBRAZOVÝCH DAT - NEMOCNÉ OČI

C.1 Úroveň jasu – data ÚBMI

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10	průměr
L1	2	3	2	2	1	1	2	2	1	1	1,7
L2	1	2	2	2	2	3	3	1	1	1	1,8
L3	1	2	2	1	1	2	3	1	1	1	1,5
L4	2	2	3	3	3	3	2	1	1	1	2,1
L5	1	2	2	3	3	2	3	1	1	1	1,9
L6	2	2	2	2	2	3	2	2	1	1	1,9
L7	1	3	2	1	1	1	1	2	1	1	1,4
L8	1	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,8
L9	1	3	2	2	2	2	3	2	1	1	1,9
L10	1	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,8
L11	2	1	2	2	2	3	2	1	1	1	1,7
L12	2	1	2	2	2	1	3	2	1	1	1,7
L13	1	2	2	2	2	1	3	2	1	1	1,7
L14	1	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1,5
R1	2	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,9
R2	1	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,8
R3	1	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1,7
R4	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1,4
R5	2	3	2	2	2	3	2	2	1	1	2,0
R6	1	3	3	2	2	2	3	1	1	1	1,9
R7	2	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1,9
R8	2	3	2	2	2	2	3	1	1	1	1,9
R9	1	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1,6
R10	1	2	2	2	2	2	3	2	1	1	1,8
R11	2	3	2	2	2	3	2	1	1	1	1,9
R12	2	3	2	2	1	1	3	2	1	1	1,8
R14	2	3	2	2	2	1	2	2	1	1	1,8
průměr	1,44	2,52	2,07	2,00	1,93	1,93	2,41	1,41	1,00	1,00	

C.2 Úroveň jasu – data Erlangen

	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8	Sektor 9	Sektor 10	průměr
L1	3	1	3	2	2	1	1	1	1	1	1,6
L6	1	1	3	2	2	3	2	1	1	1	1,7
L7	1	3	2	2	2	1	2	1	1	1	1,6
L8	1	3	2	2	2	2	3	2	1	1	1,9
L9	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1,2
L10	2	2	2	1	1	2	3	3	2	1	1,9
R1	2	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1,6
R2	2	3	2	1	2	2	2	2	2	2	2,0
R3	2	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2,2
R5	2	1	3	2	2	2	1	2	2	2	1,9
R7	1	3	2	1	1	3	3	1	1	1	1,7
R8	2	3	3	2	2	3	3	2	1	1	2,2
R9	1	1	3	3	3	3	2	2	1	1	2,0
R10	3	1	3	2	2	2	3	2	2	1	2,1
průměr	1,71	2,14	2,43	1,79	1,86	2,07	2,07	1,64	1,36	1,21	